

УДК 621.039.75

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ СТАНЦИИ

О.Л. БОБОВИЧ¹,
С.В. ГОРБУНОВ², кандидат технических наук

¹ Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, г. Гомель, Беларусь

² Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия

Для прогнозирования объема работ по дезактивации и возможного количества, состава и категории радиоактивных загрязнений является существенным вопрос о масштабах, характере и степени загрязнения местности в районе размещения радиационно-опасных объектов (РОО), которое возникает при авариях на ядерных установках с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

В работе приводятся результаты расчета параметров радиационной обстановки при авариях на АЭС, выполненных по предлагаемой расчетной модели. Верификация модели проверена на основе экспериментальных исследований в зоне Чернобыльской аварии.

Ключевые слова: радионуклид, запроектная авария на АЭС, радиационное загрязнение.

Введение. В настоящее время не разработана единая физико-математическая модель переноса радиоактивных веществ в атмосфере. Существующие подходы к решению задач рассеяния примеси [1,2] касаются определенных условий и не имеют универсального характера. С учетом коэффициентов массопереноса и при пренебрежении молекулярными силами общее уравнение диффузии имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} + W \frac{\partial C_i}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \lambda_i C_i + S_i(x, y, z, t) \end{aligned}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -го радионуклида в точке с координатами X, Y, Z , Бк/м³; K_x, K_y, K_z – коэффициенты диффузии в направлении осей X, Y, Z , м²/с; U, V, W – средние скорости распространения РВ в направлении осей X, Y, Z ; λ_i – постоянная

радиоактивного распада i -го радионуклида, s^{-1} ; $S(x, y, z, t)$ – функция, учитывающая изменение концентрации РВ за счет случайных факторов.

Уравнение (1) описывает процесс диффузии в самой общей форме и для практического использования нуждается в значительном упрощении с помощью различных допущений.

Постановка задачи и суть модели. Учитывая особенности выброса радионуклидов и характер загрязнения региона ЧАЭС, была разработана математическая модель [3], позволяющая более полно учесть особенности формирования радиоактивного загрязнения окружающей среды при радиационных авариях на АС. Основу этой усовершенствованной математической модели составляют:

статистическая модель Пасквилла-Гиффорда, используемая для расчета переноса невесомой примеси, выбрасываемой на высоту до 500 м;

модель градиентного переноса на основе полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, используемая для расчета переноса невесомой примеси, выбрасываемой на высоту более 500 м;

модель, учитывающая гравитационное осаждение с полным захватом весомой примеси (диаметром более 10 мкм) подстилающей поверхностью.

Интегральная концентрация i -го радионуклида в атмосферном воздухе в направлении распространения радиоактивной струи или облака при полном его прохождении через данную точку пространства согласно статистической модели Пасквилла-Гиффорда определяется из выражения

$$C'_i(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h_{эф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h_{эф})^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\} f_R f_F f_W, \quad (2)$$

где x – расстояние от источника выброса, м; u – средняя скорость ветра в слое перемешивания, м/с; $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ – дисперсии примеси соответственно по осям Y и X , м; Q_i – мощность выброса i -го радионуклида в атмосферу, Бк/с; $h_{эф}$ – эффективная высота выброса, м; f_R – поправка на обеднение облака за счет радиоактивного распада; f_F – поправка на обеднение облака за счет сухого осаждения

радионуклидов из облака выброса; f_W - поправка на обеднение облака за счет вымывания осадками.

Коэффициенты дисперсии $\sigma_y(x)$, и $\sigma_z(x)$ рассчитываются по формулам Смита-Хоскера:

$$\sigma_y(x) = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 10^{-4} x}}, \quad (3)$$

$$\sigma_z^{\min} = \begin{cases} f(z_0, x)g(x), & \text{при } f(z_0, x)g(x) \leq \sigma_z^{\max} \\ \sigma_z^{\max}, & \text{при } f(z_0, x)g(x) > \sigma_z^{\max} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\sigma_z^{\max}(x)$ – предельное значение дисперсии σ_z для данной категории устойчивости атмосферы, м; z_0 - шероховатость подстилающей поверхности, м.

$$g(x) = \frac{a_1 x^{b_1}}{1 + a_2 x^{b_2}} \quad (5)$$

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln \left[c_1 x^{d_1} \left(1 + \frac{1}{c_2 x^{d_2}} \right) \right], & \text{при } z_0 > 0.1 \text{ м} \\ \ln \left[c_1 x^{d_1} \left(\frac{1}{1 + c_2 x^{d_2}} \right) \right], & \text{при } z_0 \leq 0.1 \text{ м} \end{cases} \quad (6)$$

Значения параметров, входящих в формулы (3-6), приведены в [1].

Обеднение облака выброса за счет контактного осаждения или адсорбции учитываются введением коэффициента

$$f_F = \left[\exp \int_0^x \frac{\exp\left(\frac{H^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)}{\sigma_z(x)} dx \right]^{-\frac{v_g}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (7)$$

Скорость сухого осаждения v_g принимается для различных форм радионуклидов по данным [1]. При этом ее значение для инертных газов равно нулю, а для остальных радионуклидов колеблется в диапазоне от $0.8 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с. Атмосферные осадки удаляют из атмосферы часть радиоактивных примесей. На процесс вымывания влияют тип осадков и их интенсивность, физические и физико-химические свойства радиоактивной примеси (смачиваемость, растворимость, размеры, способность взаимодействовать с компонентами атмосферного воздуха). Коэффициент f_W может быть определен как

$$f_W = \exp\left(-\Lambda \frac{l}{u}\right), \quad (8)$$

где Λ - коэффициент вымывания примеси, с^{-1} ; l - расстояние по ветру, где шлейф попадает в зону осадков, м.

По данным [1] значение Λ для аэрозолей колеблется в интервале $(0.5 \div 5) \cdot 10^{-6}$ с^{-1} . Тогда, согласно формуле (8), если на протяжении всего шлейфа выброса наблюдается постоянное вымывание радионуклидов осадками, значение коэффициента f_W будет лежать в диапазоне от 0.6 до 0.9.

Плотность выпадения радионуклидов на подстилающую поверхность в результате контактного осаждения выражается формулой

$$\Sigma_g(x, y, 0) = v_g \int_0^{\infty} C_i(x, y, 0, t) dt, \quad (9)$$

а вследствие вымывания осадками как

$$\Sigma_W(x, y) = \Lambda \int_0^{H_W} C_i(x, y, z) dz, \quad (10)$$

где H_W - высота нижней границы облака как источника осадков, для практических расчетов принимается $H_W = \infty$.

В рамках принятой модели выражение (10) примет вид:

$$\Sigma_W(x, y) = \frac{\Lambda}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2(x)}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right] \quad (11)$$

Относительный вклад в суммарную плотность выпадения радионуклидов вследствие вымывания осадками для категорий устойчивости атмосферы С и D как наиболее вероятных в ненастные дни составляет $50 \pm 30\%$ [4].

Обеднение облака выброса за счет радиоактивного распада учитывается введением коэффициента

$$f_R = \exp\left(-\lambda_i \frac{x}{u}\right), \quad (12)$$

где λ_i – постоянная радиоактивного распада i -го радионуклида, с^{-1} .

При полном поглощении аэрозольных частиц подстилающей поверхностью вследствие гравитационного осаждения концентрация радионуклидов в приземном слое атмосферы и плотность выпадений определяются выражениями [1]

$$C_i'''(x, y, z) = \frac{Q_i \exp\left[-\frac{w^2}{4Bu^2} - \frac{w(z-H)}{2BuH} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]}{2\pi\sigma_y \sqrt{2Bu^2 Hx}} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{4BxH}\right] - \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{4BxH}\right] \right\} f_R; \quad (13)$$

$$\Sigma_{uc}'''(x, y) = \frac{Q_i \sqrt{H} \exp\left[-\frac{w}{2Bux} - \frac{H}{4Bx} - \frac{xw^2}{4BHux^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]}{2\pi\sigma_y x \sqrt{2Bx}}, \quad (14)$$

где w - скорость гравитационного оседания аэрозолей, определяемая, как правило, по закону Стокса с учетом поправки на форму частиц и логарифмически-нормального распределения массы частиц по их размерам, м/с; B - безразмерный параметр, зависящий от состояния приземного слоя атмосферы.

Значения коэффициентов, входящих в формулы (11 – 14), и порядок их определения отражены в [1].

Из анализа формул (2, 13, 14) следует, что для обеспечения достоверности прогноза радиационной обстановки особенно в ближней (до 30 км) зоне АС, важное значение имеет высота подъема облака выброса.

Не менее важным фактором, влияющим на формирование следа облака выброса, является дисперсный состав радиоактивных аэрозолей. Диапазон размеров частиц, поступающих в атмосферу, довольно широк: от единиц до сотен микрометров. Анализ результатов исследований, проведенных в [3], позволяет сделать вывод, что распределение размеров частиц первичного выброса Чернобыльской АС удовлетворительно описывается логарифмически-нормальным

законом, причем параметры этого распределения существенно зависят от расстояния.

Для учета полидисперсности примеси будем считать [5], что начальное распределение частиц по размерам в облаке подчиняется двухпараметрическому гамма-распределению с заданным средним радиусом $\bar{\delta}$ и дисперсией σ :

$$f(\delta) = c\delta^\alpha e^{-\beta\delta} = \frac{\beta^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha+1)} \delta \left[\left(\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta} \right)^2 - 1 \right] e^{-\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta^2} \delta} \quad (15)$$

$$\text{где: } c = \frac{\beta^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha+1)}; \quad \alpha = \left(\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta} \right)^2 - 1; \quad \beta = \frac{1}{\bar{\delta}} \left(\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta} \right)^2; \quad \bar{\delta} = \frac{\alpha+1}{\beta}. \quad (16)$$

Отметим, что гамма-функция Γ при варьировании параметров α и β позволяет приближенно описать любое унимодальное распределение, в том числе и логарифмически нормальное.

В спектре частиц можно выделить область размеров, для которых турбулентное рассеяние происходит лишь в горизонтальных направлениях, а по вертикали движение частиц представляет собой просто падение частиц с постоянной стоксовой скоростью

$$w(\delta) = \frac{2}{9} \frac{\rho g}{\mu} \delta^2, \quad (17)$$

где μ – вязкость воздуха, кг/(м·с); ρ – плотность частицы, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Различие в скоростях свободного падения частиц примеси приводит к ее рассеянию по вертикали, то есть вызывает тот же эффект, что и вертикальная турбулентность.

Критерий разбиения дисперсного состава примеси на две части, тяжелую и легкую, может быть приведен лишь приблизительно и условно.

В качестве критерия разделения частиц на две группы – тяжелых и невесомых – в работе [5] предложено использовать отношение времени падения частицы t_n и времени заполнения слоя перемешивания по вертикали примесью t_d за счет турбулентной диффузии

$$v = \frac{t_n}{t_\delta} = \frac{h}{w(\delta)} \frac{c_1^{1/2} (\varepsilon l_{0z})^{1/3}}{(h^2 - l_{0z}^2)^{1/2}}, \quad (18)$$

где h – высота слоя перемешивания, l_{0z} – вертикальный размер облака в атмосфере,

$$c = \frac{\beta^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha+1)}, \quad \alpha = \left(\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta}\right)^2 - 1, \quad \beta = \frac{1}{\bar{\delta}} \left(\frac{\bar{\delta}}{\sigma_\delta}\right)^2, \quad \bar{\delta} = \frac{\alpha+1}{\beta}, \quad \varepsilon - \text{ эмпирический}$$

коэффициент.

При $v \gg 1$ вполне допустимо пренебрежение скоростью гравитационного оседания, а при $v \ll 1$ влияние скорости оседания существенно. Задавая конкретное значение v , можно определить критический радиус, разделяющий частицы вещества примеси на две группы – тяжелую и легкую:

$$\delta_{\text{кр}}^2 = \frac{9}{2} \frac{\mu}{g\rho} \frac{h}{(h^2 - l_{0z}^2)^{1/2}} \frac{c_1^{1/2} (\varepsilon l_{0z})^{1/3}}{v}. \quad (19)$$

Для того, чтобы сгладить неопределенность резкого разделения на тяжелую и легкую части, при проведении конкретных расчетов необходимо считать тяжелыми не только частицы с радиусами от r_{max} до $r_{\text{кр}}$, но и половину частиц с радиусами от $r_{\text{кр}}$ до $(r_{\text{кр}} - \Delta r_{\text{кр}})$. При этом $\Delta r_{\text{кр}}$ выбирается в зависимости от заданного распределения размеров частиц. Аналогично к легкой части следует относить не только частицы с радиусами от $r_{\text{кр}}$ до r_{min} , но и половину частиц с радиусами от $r_{\text{кр}}$ до $(r_{\text{кр}} + \Delta r_{\text{кр}})$.

В оценке радиационных факторов медиана распределения и среднее квадратичное отклонение принимались по данным обобщающих исследований авторов [3] $\delta_{50} = 5.0$ мкм и $\sigma = 0.1$.

На основании анализа имеющихся данных об аварии Чернобыльской АЭС можно сделать вывод о процессе развития запроектной аварии на АС: первоначальный тепловой взрыв реактора с выбросом диспергированного топлива и продуктов деления (ПД) на высоту около 1 км, а затем расплавление топлива АЗ реактора и медленное истечение радиоактивных веществ на высоту несколько сотен метров с соответствующим коэффициентом фракционирования. Таким образом, на основании описанной расчетной модели, учитывающей различные механизмы поступления радиоактивных веществ в атмосферу, можно представить схему формирования следа радиоактивного загрязнения при запроектной аварии на АС, как это изображено на рис.1.

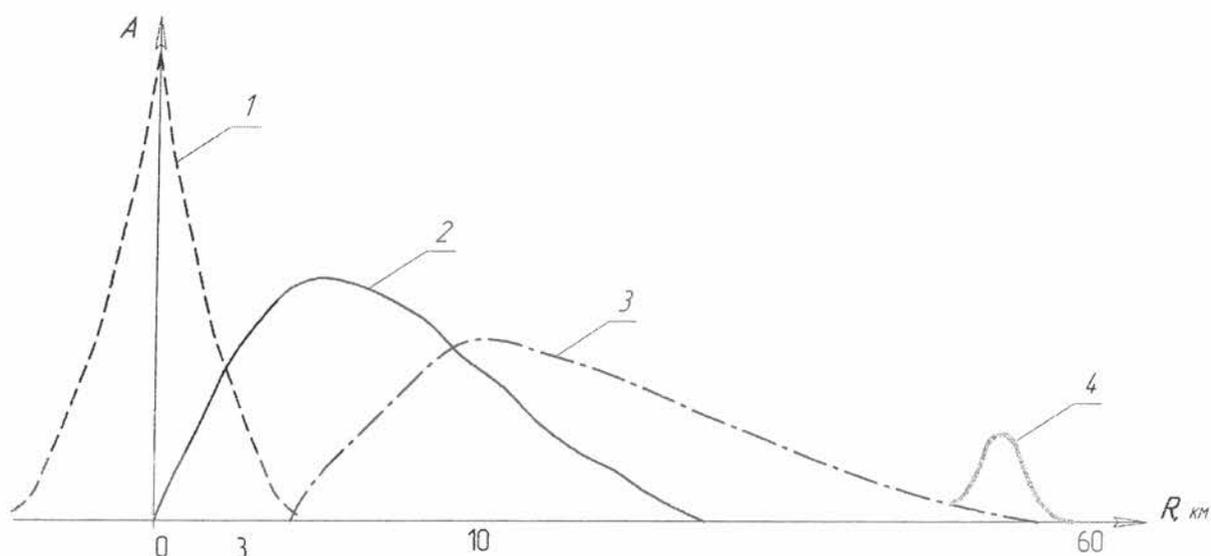


Рисунок 1 – Принципиальная схема формирования следа радиоактивного загрязнения при запроектной аварии на АС

1 - круговой выброс раздробленного топлива; 2 - выпадение топливных частиц; 3 - выпадения из паро-газовой фазы (струя); 4 - выпадения при локальных осадках

В период 1988-1989 гг. были произведены измерения плотности радиоактивного загрязнения западного, северного и южного следов в 60-километровой зоне ЧАЭС на различных расстояниях от аварийного реактора.

Пробы грунта отбирались в кольца диаметром 13 см и высотой 5 см. По азимутам через 10° на расстояниях 5, 6, 7, 8,3, 10, 12, 14,5, 17, 20, 25, 30, 37, 45, 52 и 60 км по радиусам окружностей, центром которых является 4 блок ЧАЭС. Определение радионуклидного состава проводилось на гамма-спектрометре высокого разрешения типа NOCIA с полупроводниковым детектором NaI(Tl). Полученные результаты приведены в [6].

В этой связи представляется небезынтересным провести сравнение результатов натуральных измерений с расчетами по выбранной модели, которая реализована в машинном варианте [4].

Поскольку измерения плотности радиоактивного загрязнения местности проводились спустя несколько лет после аварии, за это время на радиоактивные выпадения воздействовали факторы радиоактивного распада, смыва радионуклидов поверхностными водами, заглубления радионуклидов в почву и переход их в биологические объекты в зависимости от дисперсности выпавших аэрозолей, степени перехода радионуклидов в почвенные растворы и т.п.

Вывод. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений плотности выпадений ^{137}Cs и ^{144}Ce на следе Чернобыльской АЭС приведены на рис.2. Здесь кривые 2 и 4 соответствуют расчетам плотности выпадений ^{137}Cs и ^{144}Ce , выполненным в соответствии с моделью, не учитывающей фракционирование радионуклидов в процессе выброса на различную высоту, а кривые 1 и 3 – с введением в формулы (2, 8, 11) функции распределения по высоте.

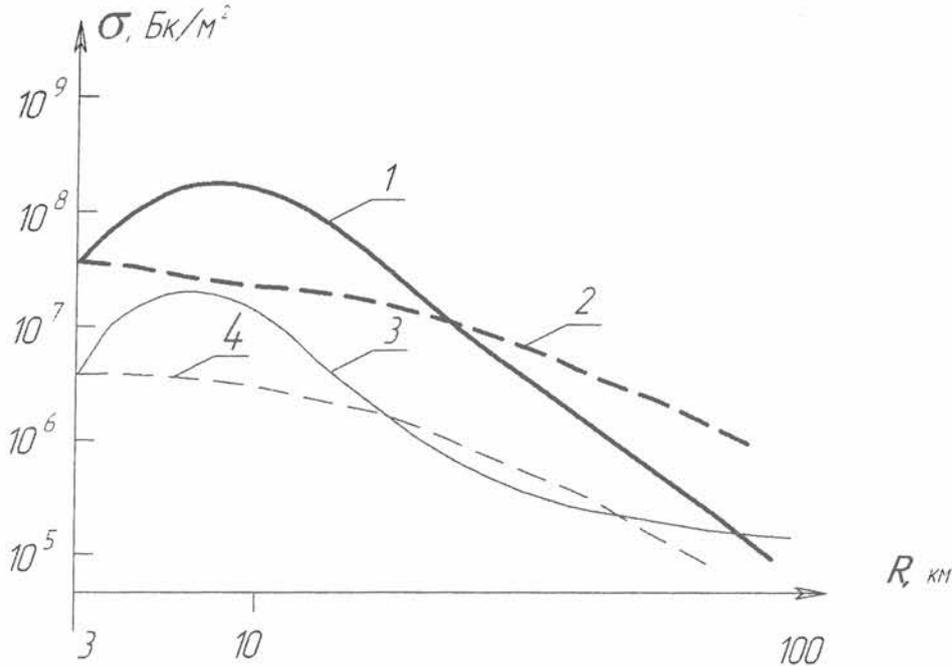


Рисунок 2 – Расчетные и экспериментальные значения плотности выпадений ^{137}Cs и ^{144}Ce на следе выброса РН при аварии на Чернобыльской АЭС
 $\circ - ^{144}\text{Ce}$, $\circ - ^{137}\text{Cs}$.

Из рис. 2 видно, что учет фракционирования радионуклидов по высоте столба выброса при расчете плотности загрязнения местности приводит к удовлетворительной сходимости расчетных данных с результатами экспериментальных исследований. Занижение прогнозных оценок по сравнению с результатами измерений в ближней зоне (до 10 км) можно объяснить наложением выпадений от нескольких выбросов (например, 26 апреля и 5 мая 1986 г.). Превышение расчетных данных в дальней зоне (50-60 км) обусловлено вымыванием радионуклидов из шлейфа выброса локальными осадками.

Литература

1. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Методика по прогнозированию и оценке радиоактивного загрязнения воздуха, почвы, водных объектов, а также возможных доз облучения в случае радиационных аварий на атомных станциях для различных вариантов метеорологических условий. М.: Госкомгидромет, 1988.-100с.
3. Горбунов С.В. Методические основы повышения безопасности поверхностных захоронений твердых радиоактивных отходов, образующихся при ликвидации последствий радиационных аварий. Диссертация ктн. 2003.
4. Галушкин Б.А., Горбунов С.В., Макушкин С.Г. Методика выявления и оценки радиационной обстановки при запроектной аварии или разрушении ядерного реактора на атомной электростанции. М.:в/ч 52609, 1990.-92с.
5. Гаврилов В.П., Гаргер Е.К., Горматюк Ю.К., Седунов Ю.С. Прогноз полей концентраций и выпадений радионуклидов в результате ветрового подъема и переноса в зоне ЧАЭС и прилегающей территории. / Тр. Всесоюзной конференции "Радиационные аспекты Чернобыльской аварии". Обнинск, 22-25 июня 1988.
6. Галушкин Б.А., Горбунов С.В. Распределение и радионуклидный состав топливных частиц в 60-километровой зоне ЧАЭС / В кн. Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере. Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции, г.Гомель, октябрь. 1990г. М.: ГеоХИ им. В.И. Вернадского, 1990.-с.65.

Поступила в редакцию 28.10.07.

Bobovich O.L., Gorbunov S.V.

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORMATION OF RADIOACTIVE POLLUTION BY OUT OF PROJECT ACCIDENT AT NUCLEAR STATION.

To forecast the amount of works on deactivation and possible quantity, composition and category of radioactive pollution the question on scales, character and degree of pollution of locality in the area of nuclear dangerous objects disposal which arises at accidents of nuclear installations with the emission of radioactive substances into atmosphere is very essential.

In work the results of calculation of parameters of radiating conditions at accidents at the atomic power station carried out on suggested calculation model are mentioned. Verification of model is checked on the basis of experimental researches in the zone of Chernobyl catastrophe.