

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.В. Перевезенцев

**Расчет дозовых нагрузок
на население от излучений радионуклидов
газоаэрозольных выбросов АЭС**

*Методические указания
к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Экология ядерной энергетики»*



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2015

УДК 621.311.25:621.039

ББК 31.4н

П27

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/189/book1061.html>

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Ядерные реакторы и установки»

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве методических указаний*

Перевезенцев, В. В.

П27

Расчет дозовых нагрузок на население от излучений радионуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС : методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Экология ядерной энергетики» / В. В. Перевезенцев. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 20, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4146-4

Изложена методика расчетного определения дозовых нагрузок на население, проживающее в регионе размещения АЭС. Такие нагрузки формируются радионуклидами — продуктами деления ядерного топлива и продуктами активации, содержащимися в газоаэрозольном выбросе АЭС с энергетическими реакторами различных типов, в том числе внешнего облучения от газоаэрозольного «факела», плоского источника, выпавших на местности радионуклидов, а также внутреннего облучения от поступивших ингаляционным путем (при дыхании) и по пищевым цепочкам (с загрязненными продуктами питания) радионуклидов в организм человека.

Для студентов 5-го и 6-го курсов кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 621.311.25:621.039

ББК 31.4н

ISBN 978-5-7038-4146-4

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015

© Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нормальной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) радионуклиды (продукты деления и продукты активации) поступают в окружающую среду с газоаэрозольными выбросами через вентиляционную трубу и с жидкими сбросами в водоем-охладитель. Эти радионуклиды загрязняют окружающую среду, накапливаются в природных комплексах и в конечном счете формируют дозовые нагрузки на население, проживающее в районе размещения АЭС.

Поступление радионуклидов в окружающую среду регламентируется Санитарными правилами проектирования и эксплуатации АЭС (СП АС—99), где установлены допустимые суточные выбросы и сбросы, при которых облучаемость населения не должна превышать выделенную на АЭС дозовую квоту в размере 0,25 мЗв/год (0,2 мЗв за счет газоаэрозольных выбросов и 0,05 мЗв за счет радионуклидов жидких сбросов). На практике дозовые нагрузки на население оказываются существенно меньше дозовой квоты. При этом непосредственное измерение чрезвычайно низких уровней доз облучения населения представляет достаточно сложную техническую задачу. Более надежные данные по облучаемости населения могут быть получены расчетным путем с использованием математических моделей распространения и накопления радионуклидов в окружающей среде.

Содержащиеся в газоаэрозольном выбросе АЭС радионуклиды перемещаются и рассеиваются в атмосфере за счет ветрового переноса и турбулентной диффузии, обусловленной наличием в атмосфере достаточно крупных вихрей, взаимодействующих между собой и с поверхностью земли. При истечении из вентиляционной трубы содержащий радионуклиды воздух образует характерный конусообразный «факел», по структуре аналогичный выбросам дымовых газов из высотных труб тепловых электростанций. «Факел» с распределенными в нем радионуклидами представляет

собой объемный излучающий источник γ -квантов и β -частиц, создающий определенную дозу внешнего облучения населения. Кроме того, в результате гравитационного осаждения и турбулентного переноса аэрозольные частицы с радионуклидами оседают на местности, образуя плоский источник ионизирующих излучений, который также вносит свою долю в дозу внешнего облучения населения. При дыхании взвешенные в приземном слое воздуха и содержащие радионуклиды газоаэрозоли попадают в организм человека (ингаляционное поступление) и становятся источником внутреннего облучения. Наконец, радионуклиды газоаэрозольного выброса АЭС могут попадать в организм человека по пищевым цепочкам вместе с загрязненными продуктами питания. При этом также формируется определенный вклад в дозу (внутреннее облучение).

В процессе работы расчеты выполняются для различных погодных условий, в значительной степени определяющих процессы рассеяния газоаэрозольных частиц, и на разных расстояниях от АЭС. Полученные результаты необходимы для количественных оценок влияния на радиационную безопасность населения в регионе размещения АЭС. Изложенные методики расчетов дозовых нагрузок широко используются не только в дисциплине «Экология ядерной энергетики», но и в дипломном проектировании студентами кафедры «Ядерные реакторы и установки» в части, касающейся разработки вопросов экологической безопасности проектируемых ядерных энергетических установок.

Целями и задачами работы являются:

- освоение студентами теоретических вопросов и практических навыков расчетного определения дозовых нагрузок на население в регионе размещения АЭС от радионуклидов газоаэрозольных выбросов с использованием гауссовой модели распространения примеси под действием конвективного переноса ветром и за счет воздействия крупномасштабных турбулентных атмосферных вихрей;
- определение значений приземной удельной объемной активности радионуклидов с целью оценки доз внешнего облучения от радионуклидов газоаэрозольного «факела» как объемного излучающего источника и плоского источника, сформированного выпавшими на местности радионуклидами, а также доз внутреннего облучения, обусловленного поступившими ингаляционным путем (при дыхании) и по пищевым цепочкам с загрязненными продуктами питания радионуклидами в организм человека.

1. ПРОЦЕССЫ РАССЕЯНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОГО ВЫБРОСА АЭС В АТМОСФЕРЕ. ГАУССОВА МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ

Газоаэрозольный выброс АЭС распространяется из вентиляционной трубы за счет ветрового и турбулентного переноса (рис. 1.1). При этом на любом расстоянии устанавливается объемная удельная активность атмосферного воздуха $a_v(x, y, z)$ по каждому содержащемуся в выбросе радионуклиду.

В результате гравитационного выпадения и турбулентного переноса из газоаэрозольного «факела» на поверхности формируется плоский источник ионизирующих излучений, характеризующийся

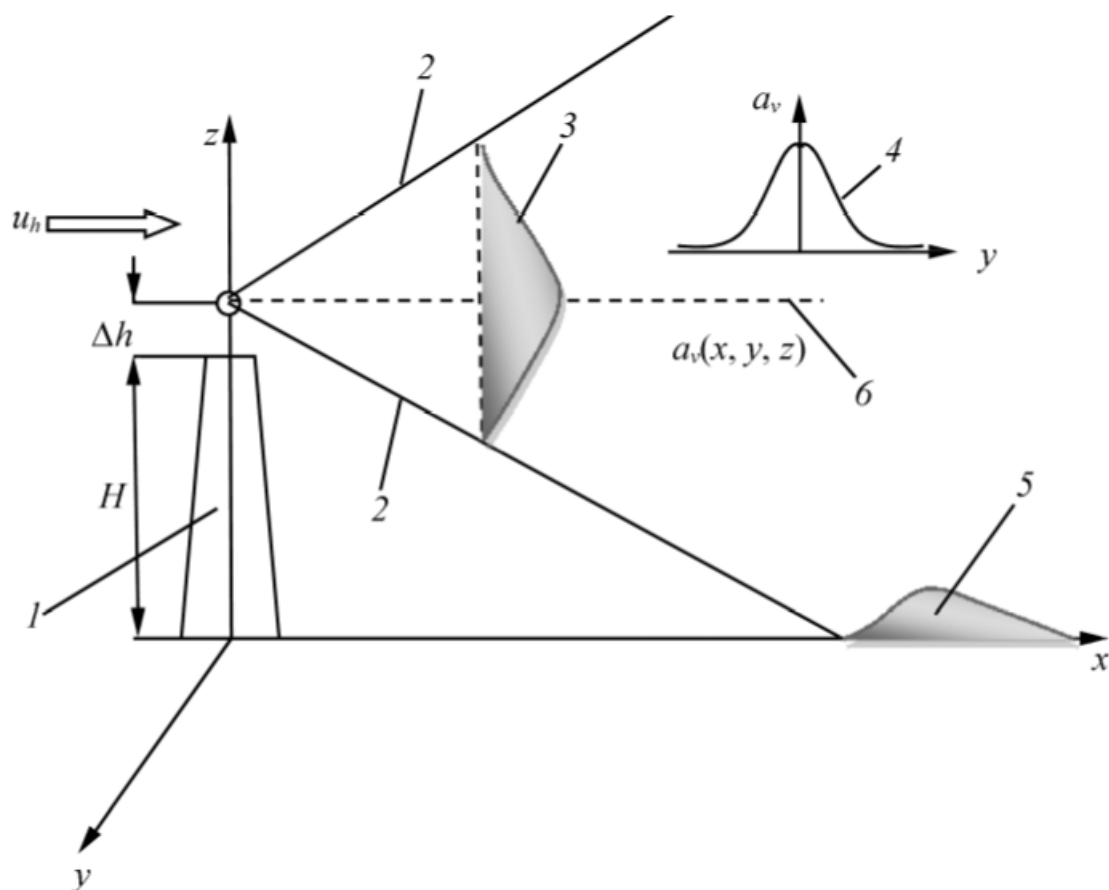


Рис. 1.1. Схема распространения газоаэрозольного выброса АЭС из вентиляционной трубы и формирование удельной объемной активности радионуклидов в атмосферном воздухе:

1 — вентиляционная труба АЭС; 2 — границы «факела» газоаэрозольного выброса; 3 — распределение удельной объемной активности по высоте по оси z ; 4 — распределение удельной объемной активности по оси y ; 5 — распределение удельной поверхностной активности (плотность выпадений радионуклидов) по оси x ; 6 — ось газоаэрозольного «факела»

поверхностной удельной активностью $a_s(x)$. Количественная информация об объемных $a_v(x, y, z)$ и поверхностных $a_s(x)$ удельных активностях дает возможность оценить дозовые нагрузки за счет внешнего и внутреннего облучения населения на заданном расстоянии x от АЭС.

Распространение радионуклидов в атмосфере обусловлено конвективным переносом с ветром и за счет воздействия крупномасштабных турбулентных атмосферных вихрей. Таким образом, этот процесс описывается дифференциальным уравнением турбулентной диффузии с конвективным переносом в направлении ветра, решение которого для стационарных условий дает выражение для объемной удельной активности в любой точке системы координат, связанной с основанием вентиляционной трубы:

$$a_v(x, y, z) = \frac{QF(x)}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_h} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (1.1)$$

где Q — мощность выброса; $F(x)$ — функция истощения газоаэрозольного «факела» за счет радиоактивного распада, гравитационного осаждения и вымывания осадками газоаэрозольных частиц; u_h — скорость ветра на высоте выброса; σ_y, σ_z — дисперсии координат газоаэрозольных частиц в направлениях y и z соответственно; h — эффективная высота выброса ($h = H + \Delta h$).

Выражение (1.1) характеризует рассеяние примеси в атмосфере в рамках так называемой гауссовой модели. Распределение концентрации примеси на любом расстоянии от вентиляционной трубы по осям x и y описывается нормальным (гауссовым) законом распределения. Значения горизонтальных и вертикальных дисперсий координат газоаэрозольных частиц зависят от типа погодных условий и определяются по соотношениям:

$$\begin{aligned} \sigma_y(x) &= c_3 x / \sqrt{1 + 0,0001x}; \quad \sigma_z(x) = F(z_0, x)g(x); \\ F(z_0, x) &= \ln \left[c_1 x^{d_1} (1 + (c_2 x^{d_2})^{-1}) \right] \quad \text{при } z_0 > 10 \text{ см}, \\ F(z_0, x) &= \ln \left[c_1 x^{d_1} (1 + (c_2 x^{d_2})^{-1}) \right] \quad \text{при } z_0 \leq 10 \text{ см}; \end{aligned} \quad (1.2)$$

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

Параметры $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ зависят от класса устойчивости погодных условий и шероховатости z_0 подстилающей поверхности. Значения указанных параметров для шести характерных классов устойчивости погодных условий по Пасквиллу — Гиффорду, а также наглядное графическое представление зависимостей $\sigma_y(x)$ и $\sigma_z(x)$ приведены в специальной литературе.

Эффективная высота газоаэрозольного выброса определяется как высота, на которой начинается распространение газоаэрозольных частиц по направлению ветра. Подъем струи воздуха над устьем вентиляционной трубы АЭС вызван инерционным движением вертикальной струи из устья вентиляционной трубы, а также разностью температур выбрасываемого воздуха и окружающего атмосферного воздуха. В качестве расчетного соотношения для оценки высоты подъема струи может быть рекомендовано следующее:

$$\Delta h = \frac{1,5w_0 R}{u_f} \left[2,5 + 3,3 g R \frac{\Delta T}{(T_s u_f^2)} \right], \quad (1.3)$$

где w_0 — скорость истечения газоаэрозольного выброса из устья трубы; R — радиус устья трубы; ΔT — разность температур выходящих из вентиляционной трубы газов и окружающего воздуха; T_s — абсолютная температура окружающего воздуха; u_f — скорость ветра на высоте флюгера (10 м).

В соответствии с классификацией Пасквилла — Гиффорда отношение погодных условий к тому или иному типу осуществляется на основе измеренных значений скорости ветра на высоте флюгера u_f и качественной оценки уровня инсоляции в дневное время и облачности в ночное время. Соответствующие данные приведены в табличной форме в научной литературе по рассматриваемой тематике. Естественно, значения скоростей ветра на эффективной высоте выброса и на высоте флюгера (10 м) существенно отличаются. Скорость ветра на эффективной высоте выброса значительно выше, чем скорость на высоте флюгера. Для определения скорости ветра на заданной высоте используют различные эмпирические соотношения, в частности, содержащие характеристики типов устойчивости погодных условий:

$$u_h = u_f \left[(h^\varepsilon - z_0^\varepsilon) / (10^\varepsilon - z_0^\varepsilon) \right], \quad (1.4)$$

где ε — безразмерный параметр, зависящий от типа устойчивости погодных условий по Пасквиллу — Гиффорду; шероховатость подстилающей поверхности z_0 в соотношении (1.4) подставляется в метрах.

В рамках гауссовой модели не учитываются процессы убывания активности радионуклида из-за его радиоактивного распада, поскольку рассматривается рассеяние примеси, т. е. изменение ее концентрации в атмосфере, а также гравитационное осаждение и вымывание осадками аэрозольных частиц. Указанные процессы в выражении (1.1) описываются так называемой функцией истощения газоаэрозольного «факела» $F(x) = F_\lambda(x)F_f(x)F_w(x)$, которая отражает снижение активности указанного «факела» с увеличением расстояния от вентиляционной трубы АЭС за счет радиоактивного распада радионуклидов $F_\lambda(x)$, сухого гравитационного осаждения $F_f(x)$ и вымывания осадками аэрозольных частиц $F_w(x)$. На расстоянии x км от вентиляционной трубы активность газоаэрозольного выброса по любому радионуклиду снижается в соответствии с законом радиоактивного распада $F_r(x) = \exp(-\lambda x/u)$. Обеднение газоаэрозольного «факела» за счет вымывания осадками также описывается экспоненциальной функцией $F_w(x) = \exp(-\Lambda x/u)$, где Λ — постоянная вымывания осадками.

Постоянная вымывания осадками линейно зависит от интенсивности осадков. Ее значение определяется выражением $\Lambda = k_r k_0 I$, где k_r — величина абсолютной вымывающей способности дождя (для всех нуклидов, за исключением инертных газов, $k_r = 10^{-5}$ ч/(мм · с), характерная для дождя интенсивностью $I = 1$ мм/ч, k_0 — относительная вымывающая способность различных типов осадков:

Тип осадков	k_0
Дождь	1,0
Дождь с грозой	1,1
Снег с дождем.....	2,4
Ливень	2,8
Снег.....	3,0
Морось.....	4,5
Туман.....	5,0

Уменьшение активности газоаэрозольного выброса за счет сухого гравитационного осаждения аэрозольных частиц определяется соотношением

$$F_f = \exp \left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{v_g}{u} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x)} \left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2(x)} \right) dx \right].$$

Скорость сухого гравитационного осаждения аэрозольных частиц на почву: для элементарного йода $v_g = 1,0$ см/с, для органических соединений йода — 0,01, для аэрозольных частиц — 0,8, для радиоактивных благородных газов $v_g = 0$ см/с.

2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ОТ РАДИОНУКЛИДОВ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОГО ВЫБРОСА АЭС

2.1. Расчет дозовых нагрузок облучения от газоаэрозольного «факела» как объемного излучающего источника

В составе газоаэрозольного выброса АЭС содержатся радионуклиды — источники γ -квантов и заряженных частиц. При перемещении «факела» газоаэрозольного выброса в направлении ветра образующееся при радиоактивном распаде радионуклидов ионизирующее излучение формирует дозовую нагрузку на человека (внешнее облучение). Содержащие радионуклиды аэрозольные частицы выпадают на подстилающую поверхность (например, землю) и образуют плоский источник ионизирующего излучения, также вносящий свой вклад в облучаемость человека (населения). При вдыхе радионуклиды ингаляционным путем попадают в организм и, накапливаясь преимущественно в его отдельных критических органах, создают дозовую нагрузку внутреннего облучения. Наконец, выпавшие на подстилающую поверхность радионуклиды включаются в биологические циклы развития растений и животных. При этом возможно поступление радионуклидов в организм человека по пищевым цепочкам. В общем виде пути формирования дозовых нагрузок на население за счет радионуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС показаны на рис. 2.1.

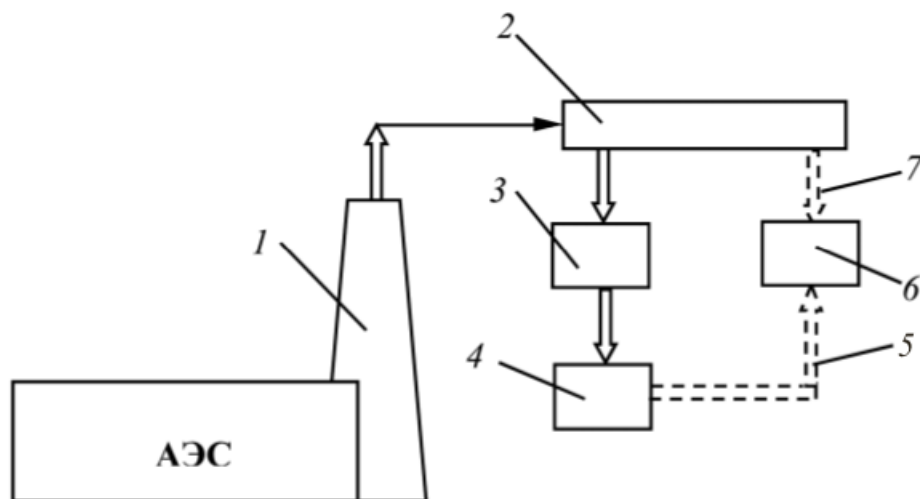


Рис. 2.1. Схема формирования дозовых нагрузок на население от газоаэрозольных выбросов в регионе АЭС:

1 — вентиляционная труба АЭС; 2 — «факел» газоаэрозольного выброса (объемный излучающий источник); 3 — выпадения газоаэрозольных частиц на подстилающую поверхность (плоский источник ионизирующих излучений); 4 — накопление радионуклидов в продуктах питания (облучаемость по пищевым цепочкам); 5 — пероральный путь поступления радионуклидов в организм человека; 6 — население; 7 — ингаляционный путь поступления радионуклидов в организм человека

Схема формирования облучаемости населения вследствие излучений содержащихся в газоаэрозольном выбросе радионуклидов приведена на рис. 2.2. Точка детектирования расположена на границе полубесконечного пространства, заполненного радионуклидами газоаэрозольного выброса. Для радионуклидов, излучающих при радиоактивном распаде γ -кванты, вклад в мощность поглощенной дозы в точке $\mathbf{r}$ детектирования элементарного объема источника dV_s определяется соотношением

$$dP_{\gamma_i}(x) = \frac{a_{\gamma_i}(x, 0, 0) dV_s \Gamma_{\text{СИ}_i}}{|\mathbf{r}|^2} \exp \left[- \int_0^{|\mathbf{r}|} \mu_{\text{в}}(E_{\gamma_i}) d\mathbf{r} \right], \quad (2.1)$$

где $a_{\gamma_i}(x, 0, 0)$ — удельная объемная активность воздуха по i -му радионуклиду в приземном слое ($z = 0$) под осью вентиляционной трубы ($y = 0$); $\Gamma_{\text{СИ}_i}$ — керма-постоянная радионуклидного источника γ -квантов; $\mu_{\text{в}}(E_{\gamma_i})$ — линейный коэффициент ослабления γ -квантов с энергией E_{γ_i} в воздухе.

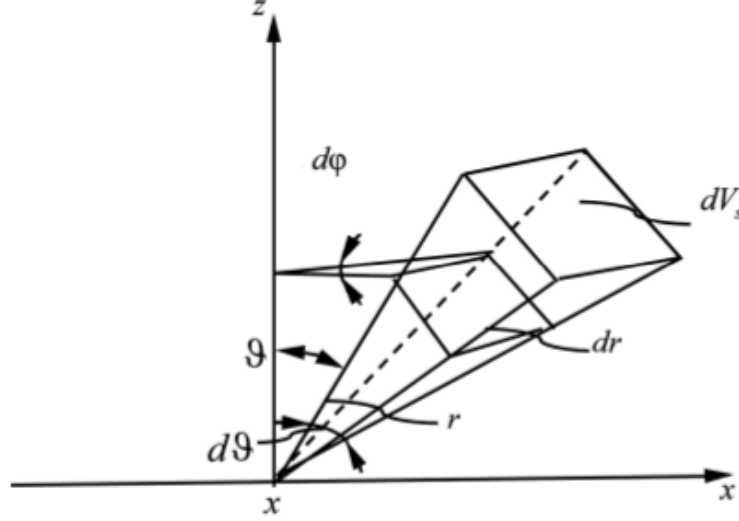


Рис. 2.2. Расчетное определение мощности дозы внешнего облучения населения на расстоянии x , км, от АЭС вследствие γ -излучения содержащихся в «факеле» газоаэрозольного выброса радионуклидов

Объем элементарного источника dV_s определяется следующим очевидным соотношением: $dV_s = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr$.

В выражении (2.1) не учитывается вклад в мощность дозы рассеянного γ -излучения из-за низкой плотности среды (воздуха). Мощность дозы в точке детектирования $\mathbf{r}$ от «факела» газоаэрозольного выброса как объемного излучающего источника может быть получена интегрированием (1.4) по всему объему источника (полубесконечного пространства)

$$P_{\gamma i}(x) = \int_{V_s} \frac{a_{v_i}(x, 0, 0) dV_s \Gamma_{\text{СИ}i}}{|\vec{r}|^2} \exp \left[- \int_0^{|\vec{r}|} \mu(E_{\gamma i}) d\vec{r} \right]. \quad (2.2)$$

В результате интегрирования из (2.2) получается расчетное соотношение для оценки мощности поглощенной дозы в точке детектирования от отдельного радионуклида газоаэрозольного выброса

$$P_{\gamma i}(x) = \frac{2\pi a_{v_i}(x, 0, 0) \Gamma_{\text{СИ}i}}{\mu_{\text{в}}(E_{\gamma i})}. \quad (2.3)$$

Общая мощность дозы, создаваемая всеми содержащимися в газоаэрозольном выбросе радионуклидами — источниками γ -квантов, равна сумме мощностей доз, создаваемых отдельными радионуклидами:

$$P_{\gamma}(x) = \sum_i P_{\gamma i}(x). \quad (2.4)$$

Очевидно, за любой период T накопленная поглощенная или эквивалентная доза (как правило, оцениваются годовые дозовые нагрузки) рассчитывается следующим образом:

$$D_{\gamma}(x, T) = P_{\gamma}(x)T. \quad (2.5)$$

Следует отметить, что для радионуклидных источников γ -квантов с дискретным спектром γ -излучения средняя энергия $E_{\gamma i} = \sum_j E_{\gamma ij} n_j / \sum_j n_j$, где $E_{\gamma ij}$ — энергия j -го γ -кванта, квантовый выход которого при радиоактивном распаде равен n_j .

2.2. Расчет дозовых нагрузок от плоского источника выпавших на поверхность земли радионуклидов

Динамика выпадения радионуклидов из приземного слоя воздуха описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{da_{s_i}(x, \tau)}{d\tau} = a_{v_i}(x, 0, 0)v_g - \lambda a_{s_i}(x, \tau), \quad (2.6)$$

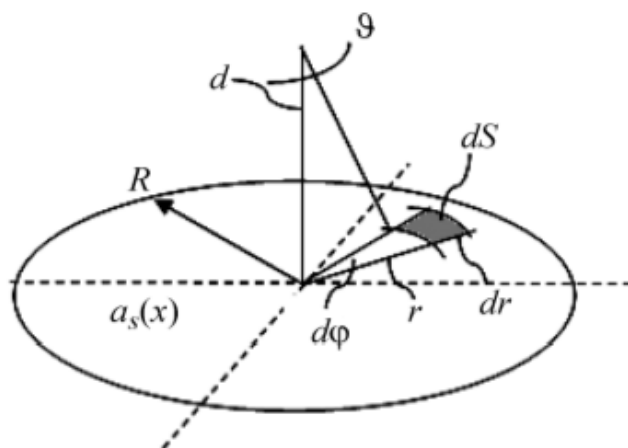
где v_g — скорость гравитационного выпадения газоаэрозольных частиц на подстилающую поверхность, определяемая как отношение интенсивности оседания активности на поверхность к удельной объемной активности в приземном слое воздуха.

В уравнении (2.6) не учитывается уменьшение поверхностного загрязнения в результате миграции радионуклидов в глубь почвенного слоя. Решение данного уравнения при начальных условиях $a_{s_i}(x, \tau = 0) = a_{s_i}(x, 0)$ имеет вид

$$a_{s_i}(x, \tau) = \frac{a_{v_i}(x, 0, 0)v_g}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i \tau}) + a_{s_i}(x, 0)e^{-\lambda_i \tau}. \quad (2.7)$$

На основе (2.7) можно оценить удельную поверхностную активность на расстоянии x от АЭС в момент времени τ . В свою очередь, по известным значениям удельной поверхностной активности рассчитывается мощность дозы, создаваемая плоским источником (рис. 2.3). Исследования показали, что угловое распределение излучения плоских источников, сформированных выпавшими на поверхность радионуклидами, соответствует косинусоидальной форме. Вклад в мощность дозы от элементарной площадки dS за счет i -го

Рис. 2.3. Схема определения мощности дозы от плоского источника, сформированного выпавшими на подстилающую поверхность из газоаэрозольного выброса радионуклидами



радионуклида в точке детектирования на высоте d от плоскости можно записать следующим образом:

$$dP_{s\gamma i}(x, \tau) = \frac{a_{s_i}(x, \tau) \Gamma_{\text{СИ}_i}}{(d^2 + r^2)} dS. \quad (2.8)$$

Здесь площадь элементарной поверхности плоского источника выражается соотношением $dS = r d\varphi dr$.

Мощность дозы от каждого i -го радионуклида для плоского бесконечного источника с косинусоидальным угловым распределением излучения

$$P_{s\gamma i}(x, \tau) = \int_S \frac{a_{s_i}(x, \tau) \Gamma_{\text{СИ}_i}}{(d^2 + r^2)} dS = 4\pi a_{s_i}(x, \tau) \Gamma_{\text{СИ}_i}. \quad (2.9)$$

По формуле

$$D_{s\gamma}(x, T) = \sum_i \int_T P_{s\gamma i}(x, \tau) d\tau \quad (2.10)$$

рассчитывается дозовая нагрузка за счет всех выпавших на поверхность радионуклидов за период T (например, за год).

2.3. Определение дозы внутреннего облучения человека при ингаляционном поступлении радионуклидов в организм

Основу расчетов внутреннего облучения человека составляют представления о преимущественном поступлении отдельных радионуклидов в его конкретные внутренние органы. Например, изотопы йода поступают в щитовидную железу, радиоактивный изотоп

^{90}Sr концентрируется в костной ткани и т. д. Таким образом, дозовые нагрузки при внутреннем облучении рассчитываются для отдельных критических органов. Ингаляционное поступление и накопление активности радионуклида в конкретном критическом органе человека описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{da_{\text{к.о}i}(\tau)}{d\tau} = \frac{If_i}{m_{\text{к.о}}} - \lambda_{\text{эф}i} a_{\text{к.о}i}(\tau), \quad (2.11)$$

где $a_{\text{к.о}i}$ — массовая удельная активность i -го радионуклида в критическом органе; I — скорость ингаляционного поступления радионуклида в организм человека; f_i — доля i -го радионуклида, поступившая в организм человека ингаляционным путем и в результате обменных процессов переходящая в данный критический орган; $m_{\text{к.о}}$ — масса критического органа; $\lambda_{\text{эф}i}$ — эффективная постоянная выведения i -го радионуклида из организма человека (определяется процессами радиоактивного распада и биологическим выведением $\lambda_{\text{эф}i} = \lambda_i + \lambda_{\text{б}i}$). Следует отметить, что скорость ингаляционного поступления радионуклида в организм человека определяется объемной удельной активностью в приземном слое воздуха $a_{\text{в}i}(x, 0, 0)$ на заданном расстоянии x , км, от АЭС и интенсивностью дыхательного процесса V , т. е. $I = Va_{\text{в}i}(x, 0, 0)\beta_i$, где β_i — доля i -го радионуклида, оставшегося в организме после выдоха и вступившего в длительные обменные процессы с последующим накоплением в критическом органе. Решение дифференциального уравнения (2.11) при начальных условиях по содержанию i -го радионуклида в критическом органе $a_{\text{к.о}i}(\tau = 0) = a_{\text{к.о}i}(0)$ имеет вид

$$a_{\text{к.о}i}(\tau) = \frac{If_i}{m_{\text{к.о}}\lambda_{\text{эф}i}}(1 - e^{-\lambda_{\text{эф}i}\tau}) + a_{\text{к.о}i}(0)e^{-\lambda_{\text{эф}i}\tau}. \quad (2.12)$$

При известной удельной массовой активности i -го радионуклида в критическом органе $a_{\text{к.о}i}(\tau)$ можно определить мощность дозы

$$P_{(\gamma, \alpha, \beta)}^{\text{ing}}(\tau) = ka_{\text{к.о}i}(\tau)\bar{E}_{\text{эф}i}, \quad (2.13)$$

где k — коэффициент пропорциональности, определяющий размерность мощности дозы; $\bar{E}_{\text{эф}i}$ — эффективная энергия γ -, β -, α -излучения, поглощаемая в пределах критического органа.

Только часть энергии γ -квантов и β -частиц, образующихся при радиоактивном распаде накопленных в критическом органе радионуклидов, поглощается в пределах данного критического органа и вносит вклад в формирование дозы. Другая часть энергии уносится за пределы данного критического органа. Поэтому значение эффективной энергии на один распад $\bar{E}_{\text{эф}i}$ отражает вклад в формирование дозы только части энергии, поглощенной в пределах данного критического органа. С учетом экспоненциального характера ослабления γ -квантов и β -частиц выражение для $\bar{E}_{\text{эф}i}$ определяется следующим образом:

$$\bar{E}_{\text{эф}i} = E_{(\gamma, \beta)_i} [1 - \exp(-\mu_{\text{эн}i} r_{\text{к.о}})],$$

где $\mu_{\text{эн}i}$ — линейный коэффициент поглощения энергии γ -квантов или β -частиц в биологической ткани; $r_{\text{к.о}}$ — размер критического органа, определенный как радиус эквивалентной по объему сферы.

Выражением

$$D_{(\gamma, \alpha, \beta)}^{\text{инг}}(T) = \sum_i \int_T P_{(\gamma, \alpha, \beta)_i}(\tau) d\tau \quad (2.14)$$

так же, как и в предыдущих случаях, определяется дозовая нагрузка за некоторый период T .

2.4. Расчет дозовых нагрузок по пищевым цепочкам вследствие употребления загрязненных радионуклидами продуктов питания

Расчет дозовых нагрузок по пищевым цепочкам проводится в предположении, что употребляются только местные загрязненные радионуклидами продукты питания. Это позволяет оценить максимально возможные уровни облучения населения в регионе размещения АЭС. Очевидно, что ожидаемая индивидуальная эквивалентная доза, формирующаяся при употреблении загрязненных продуктов питания, пропорциональна уровню загрязнения радионуклидами территорий, предназначенных для производства сельскохозяйственной продукции:

$$D_{(\gamma, \alpha, \beta)_i}^{\text{пщ}}(\tau) = a_{Si}(x, \tau) k_{fi}^{\text{ind}} B_{id}, \quad (2.15)$$

k_{fi}^{ind} — коэффициент перехода активности выпавших на почву радионуклидов в организм человека через продукты питания, Бк/(Бк/м²) при единичной удельной поверхностной активности загрязнения почвы i -радионуклидом; B_{id} — дозовый коэффициент, представляющий собой эквивалентную дозу внутреннего облучения человека, которая образована за счет поступившего пероральным путем i -радионуклида с активностью 1 Бк. Дозовый коэффициент B_{id} имеет размерность Зв/Бк.

Из выражения (2.15) следует, что мощность эквивалентной дозы пропорциональна мощности выпадений радионуклидов на почву

$$P_{(\gamma, \alpha, \beta)_i}^{\text{пщ}}(\tau) = \frac{a_{Si}(x, \tau)}{d\tau} k_{fi}^{\text{ind}} B_{id}. \quad (2.16)$$

Следует отметить, что коэффициент перехода k_{fi}^{ind} можно представить в виде соотношения

$$k_{fi}^{\text{ind}} = k_{fi} \bar{S}, \quad (2.17)$$

где k_{fi} — безразмерный коэффициент, отражающий уменьшение содержания (активности) радионуклида в процессе хранения и кулинарной обработки загрязненного продукта питания; $\bar{S}$ — площадь, необходимая для выращивания сельскохозяйственной продукции, удовлетворяющей годовые потребности одного человека (индивидуума) в данном продукте питания, м².

Значение $\bar{S}$ можно оценить по следующим соотношениям:

- для растительной сельхозпродукции

$$\bar{S} = I_m / P_y,$$

где I_m — годовое потребление индивидуумом сельхозпродукции данного вида, кг; P_y — годовая урожайность сельхозпродукции в данной местности, кг/м²;

- для животноводческой продукции

$$\bar{S} = (I_m / P_a) \sum_i \bar{S}_{ai},$$

где I_m — годовое потребление одним человеком мясной (молочной) продукции, кг (л); P_a — годовая продуктивность одного животного (для мясной продукции), кг, или удойность (для молочной продукции), л; $\bar{S}_{a_i}$ — площадь одной кормовой культуры, обеспечивающая годовое кормление одного животного.

Безразмерный коэффициент k_{fi} отражает долю i -го радионуклида в продукте питания на момент употребления в пищу по отношению к общему выпавшему на данную площадь количеству радионуклидов. В первом приближении значение k_{fi} можно принять равным единице, тогда соответствующие расчеты дадут максимальные уровни дозовых нагрузок. Кроме того, коэффициенты перехода k_{fi}^{ind} приведены в справочной литературе. Значения дозовых коэффициентов B_{id} также даны в литературе.

Выражением

$$D^{III}(T) = \sum_i D_{(\gamma, \alpha, \beta)_i}^{III}(T) \quad (2.18)$$

определяется общая годовая эквивалентная доза на человека (индивидуума) в результате употребления загрязненных радионуклидами продуктов питания.

3. ОБЩИЕ ГОДОВЫЕ ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА НАСЕЛЕНИЕ

Прогноз облучаемости населения в регионе размещения АЭС представляет собой сумму годовых дозовых нагрузок, образованных рассмотренными выше путями:

$$D(x, T) = D_\gamma(x, T) + D_{s\gamma}(x, T) + D_{(\gamma, \alpha, \beta)}^{ing}(x, T) + D_{(\gamma, \alpha, \beta)}^{III}(x, T).$$

Следует отметить, что уровень удельной объемной активности $a_{vi}(x, 0, 0)$ радионуклидов в приземном слое воздуха является определяющим фактором, от которого в той или иной степени зависят все составляющие общей дозовой нагрузки. Однако на значение $a_{vi}(x, 0, 0)$ существенно влияет эффективная высота h газоаэрозольного выброса, которая, в свою очередь, зависит от температуры окружающего атмосферного воздуха. Это означает, что дозовые нагрузки по всем путям формирования в разных сезонах

года будут отличаться. Поэтому при расчетах целесообразно разделить год на четыре сезона с характерными для данной местности средними температурами атмосферного воздуха. Эффективная высота газоаэрозольного выброса должна быть оценена для каждого сезона, а значение удельной объемной активности $a_v(x, 0, 0)$ в приземном слое воздуха определяется с учетом полученного для данного сезона значения h .

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА НАСЕЛЕНИЕ, ПРОЖИВАЮЩЕЕ В РЕГИОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС

Исходными данными для расчета дозовых нагрузок на население на расстоянии x , км, от АЭС за счет радионуклидов газоаэрозольных выбросов энергоблока с энергетическим реактором заданного типа являются следующие.

1. Мощность газоаэрозольного выброса энергоблока АЭС, Q , Бк/сут;
2. Радионуклидный состав газоаэрозольного выброса:
 - радиоактивные благородные газы (РБГ) — продукты деления и активации: ^{41}Ar , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe ;
 - продукты деления: ^{131}I , ^{137}Cs ;
 - радиоактивные продукты коррозии: ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{60}Co .
3. Геометрические характеристики вентиляционной трубы: высота H и радиус устья R .
4. Объемный расход воздуха, выбрасываемого в атмосферу через вентиляционную трубу, Q_v , $\text{м}^3/\text{с}$.
5. Тип устойчивости погодных условий по Пасквиллу — Гиффорду и соответствующая ему скорость ветра на высоте флюгера (10 м).
6. Шероховатость подстилающей поверхности z_0 , м.
7. Вид и плотность осадков I , мм/ч, в данный сезон.

5. ОТЧЕТ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Отчет по выполненной курсовой работе должен включать:

- техническое задание на проведение расчетных оценок дозовых нагрузок на население от радионуклидов газоаэрозольных выбросов в регионе размещения АЭС; исходные данные для индивидуального варианта характеристик газоаэрозольного выброса (мощность, ради-

онуклидный состав) для энергоблока с энергетическим реактором заданного типа, количественные характеристики погодных условий рассеяния газоаэрозольных выбросов в атмосферном воздухе;

- введение (актуальность расчетного исследования облучаемости населения в регионе размещения АЭС, краткую характеристику механизмов формирования дозовых нагрузок от радионуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС, нормативные ограничения облучаемости населения);

- теоретическую часть, включающую краткое описание гауссовой модели рассеяния примеси в атмосферном воздухе за счет конвективного переноса в направлении ветра и турбулентной диффузии, методики определения приземной удельной объемной активности с учетом функций истощения газоаэрозольного «факела» из-за радиоактивного распада, вымывания радионуклидов атмосферными осадками и гравитационного осаждения аэрозольных частиц;

- краткое изложение методик расчета дозовых нагрузок внешнего облучения от радионуклидов газоаэрозольного «факела», плоского источника, сформированного выпавшими на почву радионуклидами; внутреннего облучения радионуклидами, поступившими в организм человека ингаляционным и пероральным путями, результаты расчетов, представленные в табличной форме и в виде графиков зависимостей годовых дозовых нагрузок от расстояния от АЭС;

- анализ результатов расчетного исследования, включающий сопоставление роли различных механизмов формирования дозовых нагрузок на население от радионуклидов газоаэрозольных выбросов, а также выявление радионуклидов, создающих наибольшие дозовые нагрузки;

- заключение (выводы) с изложением полученных закономерностей изменения дозовых нагрузок в зависимости от расстояния от АЭС; сопоставление полученных результатов расчета дозовых нагрузок с нормативными значениями, приведенными в «Санитарных правилах проектирования и эксплуатации АЭС» (СП АС–99);

- список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте номенклатуру радионуклидов газоаэрозольных выбросов. Каким образом можно снизить мощность газоаэрозольных выбросов?

2. Перечислите механизмы переноса радионуклидов газоаэрозольных выбросов АЭС в атмосферном воздухе.

3. В какое время года (зимой или летом) уровни удельной приземной активности радионуклидов газоаэрозольного выброса АЭС выше? Дайте подробный анализ.

4. Могут ли радионуклиды быть обнаружены на подстилающей поверхности ближе точки касания «факела» газоаэрозольного выброса?

5. В газоаэрозольном выбросе АЭС содержатся радионуклиды ^{133}Xe и ^{60}Co . Для какого из этих радионуклидов плотность выпадений на подстилающую поверхность выше?

6. Покажите графически качественный характер обеднения «факела» газоаэрозольного выброса изотопами ^{133}Xe ($T_{1/2} = 2,19$ сут) и ^{135}Xe ($T_{1/2} = 9,08$ ч).

7. Как отличаются факторы обеднения «факела» газоаэрозольного выброса АЭС за счет гравитационного осаждения для радионуклидов ^{60}Co и ^{59}Fe для одинаковых расстояний от АЭС?

8. Сравните роль вымывания осадками радионуклидов ^{133}Xe и ^{60}Co из газоаэрозольного выброса АЭС.

9. Сравните вклад радионуклидов ^{133}Xe и ^{131}I в облучаемость населения за счет ингаляционного поступления их в организм человека.

10. Как соотносятся между собой расстояния от АЭС, где достигаются максимальные уровни приземной активности радионуклидов газоаэрозольного выброса для крайне неустойчивых (А) и предельно устойчивых (F) погодных условий?

ЛИТЕРАТУРА

Бадяев В.В., Егоров Ю.А., Казаков С.В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990. 224 с.

Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.

Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. М.: МХО ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, 1992. 334 с.

Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Энергоатомиздат, 2009.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Процессы рассеяния радионуклидов газоаэрозольного выброса АЭС в атмосфере. Гауссова модель рассеяния.....	5
2. Основы методики расчета дозовых нагрузок от радионуклидов газоаэрозольного выброса АЭС.....	9
2.1. Расчет дозовых нагрузок облучения от газоаэрозольного «факела» как объемного излучающего источника	9
2.2. Расчет дозовых нагрузок от плоского источника выпавших на поверхность земли радионуклидов.....	12
2.3. Определение дозы внутреннего облучения человека при ингаляционном поступлении радионуклидов в организм.....	13
2.4. Расчет дозовых нагрузок по пищевым цепочкам вследствие употребления загрязненных радионуклидами продуктов питания	15
3. Общие годовые дозовые нагрузки на население	17
4. Исходные данные для расчета дозовых нагрузок на население, проживающее в регионе размещения АЭС.....	18
5. Отчет по выполненной курсовой работе	18
Контрольные вопросы	19
Литература.....	20

Учебное издание

Перевезенцев Владимир Васильевич

**Расчет дозовых нагрузок
на население от излучений радионуклидов
газоаэрозольных выбросов АЭС**

Редактор *Т.М. Еришова*

Художник *А.С. Ключева*

Корректор *Т.И. Ложкарева*

Компьютерная верстка *Е.В. Ляшкевич*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 07.04.2015. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 50 экз. Изд. ЛР-0044-2014. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com