
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК [621.311.25:551.5](569.5)

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА АЭС
«БУШЕР» В ИРАНЕ**

© 2017 А.П. Елохин, Е.А. Алалем, А.И. Ксенофонов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе рассматривается метод оценки необходимого и достаточного количества постов автоматизированной системы радиационной обстановки окружающей среды в санитарно-защитной зоне второго блока АЭС «Бушер» в Иране, размещаемых вокруг АЭС, а также обоснование способа их расстановки.

В основе метода лежат данные метеорологических наблюдений в указанном районе, представляющие собой результаты измерений скорости ветра и температуры на различной высоте на метеомачте и методика градиентных наблюдений указанных характеристик, для каждого месяца в течение 2006–2010 гг.

Полученные характеристики дают возможность провести расчёты состояния устойчивости атмосферы в рамках известной модели её приземного слоя и определяющие его метеорологические параметры - скорости воздушного потока, температуру, коэффициент турбулентной диффузии и энергию турбулентных пульсаций в виде функций высоты, путём решения замкнутой системы уравнений, описывающих состояние приземного слоя атмосферы.

Знание метеопараметров атмосферы позволяет сформулировать задачу по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды путём решения уравнения турбулентной диффузии в условиях гипотетической радиационной аварии на АЭС «Бушер» и определить необходимое и достаточное число постов АСКРО, а также способ их расстановки вокруг АЭС, позволяющий учесть ограниченность информации относительно радионуклидного состава радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере в условиях аварии.

Работа может представлять интерес для работников атомной промышленности, занимающихся эксплуатацией Атомных электростанций, научных сотрудников проектных организаций, разрабатывающих проекты автоматизированных систем типа АСКРО для предприятий атомной, металлургической и химической промышленности, экологов и др.

Ключевые слова: радиационная авария, метеорологические характеристики, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение окружающей среды, детекторы ионизирующего излучения, устойчивое и неустойчивое состояния атмосферы.

Поступила в редакцию: 08.12.2017

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] авторами рассматривались основные параметры района размещения проектируемой АЭС «Бушер» (1-го блока) в Иране с последующей систематизацией данных по основным характеристикам площадки, намеченной для строительства атомной электростанции. В представленной работе тема получила дальнейшее развитие, но основное внимание уделялось изучению метеорологических характеристик площадки АЭС и обоснованию системы радиационного контроля путём прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды при гипотетической радиационной аварии.

Моделирование распространения радиоактивного загрязнения окружающей играет важную роль при проектировании объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в частности, атомных станций. В случаях, когда необходимо минимизировать степень экологической опасности, важно своевременно и максимально точно определить направление возможного распространения радиоактивной примеси, ее объемную активность, а также характер распределения радиоактивного следа на местности.

В рассматриваемом нами случае ОИАЭ является стационарным объектом (АЭС). Его особенностью является то, что выход радионуклидов в атмосферу, происходит, как правило, на большой высоте, что является причиной распространения радиоактивного загрязнения на обширной территории. Газоаэрозольные выбросы создают в атмосферном воздухе аэродисперсные массы, которые в результате турбулентного движения долгое время удерживаются в атмосфере и переносятся воздушными потоками из района расположения станции на значительное расстояние [2]. Скорость и дальность переноса таких масс зависит от турбулентных течений в атмосфере, времени их существования в воздухе, метеорологических условий, а также скорости и направления атмосферных потоков и периода полураспада радионуклидов.

Физическая сторона рассматриваемой проблемы связана с анализом распространения и осаждения радионуклидов. Однако практически все компьютерные модели нуждаются в постоянной корректировке определенных данных, основанных на экологических и метеорологических наблюдениях.

В рассматриваемой работе необходимые метеорологические параметры предварительно получали путём их измерения на метеорологической мачте, а общий характер их зависимости как функции высоты – на основе решения замкнутой системы уравнений приземного слоя атмосферы [3].

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для моделирования возникновения гипотетической аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу и определения уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды, а также дозовых нагрузок на персонал и население предполагается использование автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), общие характеристики которой достаточно подробно представлены в работах [4-7]. Данная система способна предоставить текущую информацию по развитию радиационной аварии в режиме реального времени всем необходимым структурам для своевременной оценки риска и принятия решений с целью минимизации последствий аварии.

В соответствии со сказанным выше, можно считать, что система АСКРО обеспечена соответствующими приборами и оборудованием, которое предназначено для целей сбора и обработки информации по радиоактивному загрязнению окружающей среды, оценки дозовых нагрузок на персонал и население, передачи обработанной информации руководству для принятия решений в соответствии с планом-мероприятий в случае возникновения радиационной аварии на АЭС [8].

В настоящей работе при рассмотрении сценария, обусловленного выходом радиоактивных газоаэрозольных примесей в атмосферу, рассматривается задача оценки необходимого и достаточного количества детекторов γ -излучения, размещаемых в санитарно-защитной зоне АЭС в рамках АСКРО, с целью надёжной регистрации радиоактивного облака или факела выбросов, переносимых ветром в атмосфере. Приводится математическая формулировка постановки задачи и метод ее решения.

Рассматривая в качестве субстанции объемную активность газоаэрозольной

радиоактивной примеси, загрязняющей окружающую среду, $q(x, y, z)$ (Ки/м³), метеопараметры атмосферы: $u(z)$ – продольную скорость воздушного потока (поперечную скорость полагаем равной нулю), $k(z)$ – коэффициент турбулентной диффузии и $b(z)$ – энергию турбулентных пульсаций (энергию турбулентных вихрей), определяемые в рамках модели приземного слоя атмосферы, находим, используя физико-математический аппарат работы [3].

$$k(z) = \chi v_* L k_n; \quad u(z) = v_* u_n / \chi; \quad b = v_*^2 c^{-1/2} b_n = 4,6625 v_*^2 b_n, \quad (1)$$

где $z_n = z/L$ – безразмерная высота;
 L – масштаб Монина - Обухова (масштаб приземного слоя атмосферы);
 b_n – безразмерная энергия турбулентных пульсаций;
 c – постоянная;
 u_n – безразмерная скорость ветра;
 v_* – динамическая скорость;
 $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана;
 θ – потенциальная температура $\theta = T(1000/P)^{0,29}$ (T – температура °K;
 P – атмосферное давление мбар;
 θ_n – ее безразмерная величина $\theta_n = -\chi \theta / \theta_*$, $\theta_* = P_0 / (\rho c_p v_*)$,
 P_0 – поток тепла,
 ρ – плотность воздуха,
 c_p – удельная теплоемкость);
 $\alpha_T = k_T/k$ – отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения.

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3; \quad (2)$$

$$k_n = 1 - y^4, \quad (3)$$

где y – табулированное значение для различных z_n [3].

Для безразмерных u_n, b_n , получаем следующие выражения:

$$u_n = 2/y + 2 \arctg(y) + \ln \frac{|1-y|}{1+y} + c_1; \quad (4)$$

$$b_n = y^2; \quad (5)$$

$$\theta_n = \int_{z_{0n}}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n}; \quad (6)$$

$$L = - \frac{v_*}{\chi (g/T_0) (P_0 / \rho c_p)}, \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения;
 T_0 – температура на уровне земли.

Уравнение (2) относительно y имеет аналитическое решение Феррари и зависит

от z_n следующим образом [6,7]:

$$y = \begin{cases} \frac{-\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \geq -4/3; \\ \frac{\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \leq -4/3, \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{где } A = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} + \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}; \quad B = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} - \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}.$$

Зависимости скорости приземного ветра $u(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ и энергии турбулентных пульсаций $b(z)$ как функций высоты z в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя: v_* и L . Значения последних находят, используя методику градиентных наблюдений над скоростью ветра и температурой следующим образом [3,6-7]. Измеряют на двух уровнях скорость ветра и температуру, например, $z_1 = 2H$, $z_2 = 0,5H$ ($H = 1\text{ м}$). Находят разности $Du = u(z_1) - u(z_2)$; $D\theta = \theta(z_1) - \theta(z_2)$. Используя формулу (7) и выражение для скорости ветра и температуры через безразмерные величины, получают $P_0/\rho_{CP} = -\chi v_* D\theta/D\theta_n$;

$$Du = v_* Du_n / \chi; \quad (Du/Du_n)^2 = (g/T_0)L(D\theta/D\theta_n), \quad (9)$$

где $u_n; \theta_n$ – табулированные значения универсальных функций, вычисленных для различных z_n ($z_n = z/L$) [3], Du_n ;

$D\theta_n$ – их разность.

Поскольку $Du; D\theta$ – измеряемые величины, а $Du_n; D\theta_n$ зависят от масштаба Монина – Обухова L , то выражение (9) есть явно-неявная функция L . Для нахождения L задаются некоторым значением L_{\max} и варьируют его, например, $L_i = DL \cdot i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$; $DL = L_{\max}/N$ до тех пор, пока разность ξ или относительная погрешность ε не будет минимальной (в пределе $\varepsilon \rightarrow 0$, см. рис. 1).

$$\xi = \left| \left(\frac{Du}{Du_n} \right)^2 - \frac{g}{T_0} L \frac{D\theta}{D\theta_n} \right|, \quad \varepsilon = \left| \frac{(Du/Du_n)^2 - (gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}{(Du/Du_n)^2} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

Найденное значение L^* , при котором ε минимальна, и определит искомое значение L : $L^* = DL \cdot i^*$. Определив масштаб Монина – Обухова L и пересчитав z_n при фиксированных z_1 и z_2 , т.е., таким образом, пересчитав $D\theta_n; Du_n$, найдем v_* :

$$v'_* = \chi \frac{Du}{Du_n} \quad (11)$$

или

$$v''_* = \chi \sqrt{(gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}. \quad (12)$$

При стремлении $\varepsilon \rightarrow 0$ $v' \rightarrow v''$. Рассмотренный метод более целесообразен при расчёте метеопараметров на ЭВМ. Следует отметить, что представление ε в виде зависимостей (11) и (12), собственно говоря, и позволяет находить масштаб приземного слоя атмосферы L в виде выражения (10). Поскольку параметр L может быть как $L > 0$ так и $L < 0$ (при $L = 0$ режим движения теряет турбулентный характер [3]), то всевозможные вариации L_i должны проводиться по формуле: $L_i = DL(N + 1 - i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N, N+1, N+2, \dots, 2N+1$. Последнее позволяет учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. Для расчета $u_n(z_n)$, $k_n(z_n)$ при найденном L целесообразно пользоваться не таблицами, а аналитическим значением u как функцией z_n , определяемой формулой (8), а для оценки разности безразмерных скорости воздушного потока и температуры в соответствии с видом этих зависимостей, определяемых формулами (4), (6), использовать выражения:

$$Du_n = u_n(z_{1n}) - u_n(z_{2n}) = 2 \left(\frac{y(z_{2n}) - y(z_{1n})}{y(z_{2n})y(z_{1n})} \right) + 2(\arctg(y(z_{1n})) - \arctg(y(z_{2n}))) + \ln \left(\frac{|1 - y(z_{1n})| |1 + y(z_{2n})|}{|1 - y(z_{2n})| |1 + y(z_{1n})|} \right),$$

$$D\theta_n = \int_{z_{2n}}^{z_{1n}} \frac{1}{\alpha_T(z_n) [1 - (y(z_n))^4]} dz_n.$$

Выбор u_n , θ_n по заданному z_n осуществляется следующим образом: при известном z_n находят y , по которому из таблицы находят значения соответствующие u_n или θ_n . Аналогично находят значения этих функций для другого значения z_n (другого уровня), вычисляя затем разности Δu_n , $\Delta \theta_n$. После определения параметров L , v_* значения $u(z)$, $k(z)$ находят по формулам (1). Постоянную c_1 в (4) находят при $z = z_0$ и $u(z)|_{z=z_0} = 0$.

Для определения зависимости метеопараметров атмосферы, таких как скорость приземного ветра $u(z)$ и коэффициент турбулентной диффузии $k(z)$, как функций от высоты над подстилающей поверхностью (z), использовались параметры, полученные с метеовышки, находящейся на расстоянии около 100 км от промплощадки АЭС. Собранные с двух высотных отметок метеоданные по температуре, давлению, скорости и направлению ветра были усреднены ежемесячно.

Таблица 1. – Характеристики нижнего 100-метрового слоя атмосферы по результатам измерений на мачте в 2006 – 2010 годы [9] [Characteristics of the lower 100-meter atmosphere layer as measured by mast in 2006–2010]

Высота, м	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура воздуха, °C													
10	12,3	16,9	20,5	25,6	30,7	32,6	33,7	33,9	31,9	28,0	21,8	19,9	26,7
45	12,7	16,6	20,9	26,0	30,8	32,3	33,6	33,9	32,3	238,9	22,6	21,7	27,0
80	13,0	16,9	21,6	26,6	31,4	32,8	33,9	34,0	32,5	29,2	23,0	22,0	27,4
100	13,1	16,9	21,9	26,8	31,6	32,8	33,9	33,7	32,1	28,8	23,1	21,8	27,3
Скорость ветра, м/с													
10	3,0	2,8	3,2	3,3	3,2	3,6	3,3	2,7	2,7	2,5	3,0	2,9	3,0
45	5,0	5,0	5,0	4,9	4,7	5,0	4,6	3,7	3,9	3,7	4,9	4,5	4,5
80	6,0	6,0	6,0	5,6	5,5	5,8	5,2	3,9	4,3	4,1	5,8	5,1	5,1
100	6,4	6,5	6,5	6,0	6,0	6,4	5,7	4,1	4,5	4,3	6,2	5,4	5,5

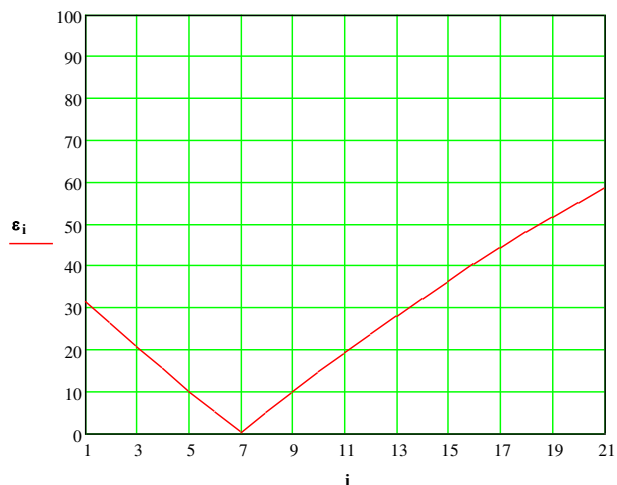


Рис. 1. – Значения индекса i , где наблюдается минимальная относительная погрешность ε_i (февраль)
[Value of the index i , with which the minimum relative error ε_i is observed (February)]

июля (VII) и августа (VIII) [9].

При определенной в ходе расчета минимальной относительной погрешности $\varepsilon(i)$ были получены экстремальные значения индекса i , при которых наблюдается минимум ε_i , используемый для дальнейшего вычисления масштаба Монина-Обухова L , а

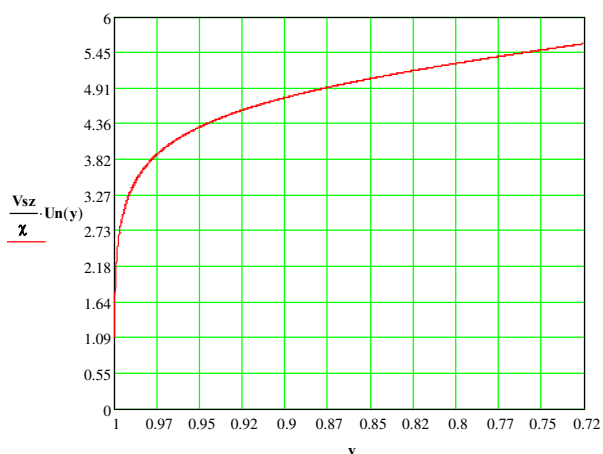


Рис. 2. – Распределение скорости ветра при устойчивом состоянии атмосферы (расчет авторов), характеризуемых параметрами $L = 85$ м; $v^* = 0,229$

($y = 1 \rightarrow z = 0$; $y = 0,72 \rightarrow z = 100$ м (февраль)
[Distribution of wind speed in atmosphere stable state (authors' calculation), characterized by parameters $L = 85$ m; $v^* = 0,229$ ($y = 1 \rightarrow z = 0$; $y = 0,72 \rightarrow z = 100$ m (February))]

коэффициента турбулентной диффузии $k(y)$, а на рисунке 4 – зависимость от y энергии турбулентных пульсаций $b(y)$. Аналогичные характеристики для января, марта, июля и августа приведены в приложении. Анализ полученных в ходе расчета значений масштаба приземного слоя (параметра Монина-Обухова) L позволил сделать вывод, что характер состояния атмосферы в районе площадки АЭС «Бушер» в общем, является изменчивым, т.е. изменяется от устойчивого ($L = 85$) до средне неустойчивого ($L = - 8,0$). Об этом, в частности, свидетельствуют сезонные изменения диапазона скорости ветра и температуры.

Усредненные метеорологические данные с учетом указанного распределения и оценкой минимальных и максимальных значений представлены в таблице 1. Значения температуры воздуха на уровне подстилающей поверхности в точке $z = z_0$, получали методом её экстраполяции, требуя непрерывности производной, обеспечивающей «гладкость» кривой, построенной по метеоданным с метеовышки и сглаженной путём применения сплайнов. Расчёт метеопараметров проводился для наиболее характерных метеорологических условий из указанных в таблице сезонов, а именно для января (I), февраля (II), марта (III),

найденные значения v_* по формуле (11), дали возможность рассчитать по формулам (1) значения скорости воздушного потока $u(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ и энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, которые приведены на соответствующих рисунках для каждого из указанных месяцев. Анализ зависимости, приведенном на рисунке 1, показывает, что с ростом индекса i относительная погрешность $\varepsilon(i)$ уменьшается до нуля при некотором $i^* = 7$, определяя, таким образом, $L_i^* = \Delta L \cdot i^*$, и затем снова резко возрастает, определяя расходимость решения. Подобный характер зависимости $\varepsilon(i)$ оказывается справедливым практически для всех сезонов. На рисунке 2 приведена зависимость распределения скорости ветра $U_n(y)$ как функции y (высоты z), учитывая, что зависимость $y(z_n)$ определяется формулой (8). На рисунке 3 приведена зависимость

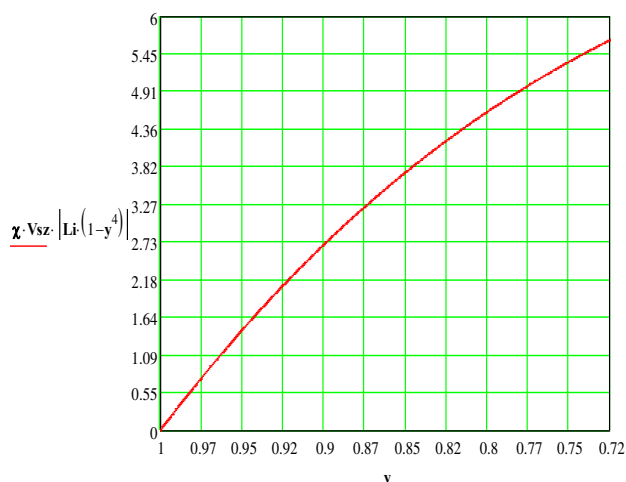


Рис. 3. – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$, для устойчивого состояния атмосферы $L = 85$; $v^* = 0,229$ (февраль) [Dependence of turbulent diffusion coefficient $k(z)$, for atmosphere stable state $L = 85$; $v^* = 0.229$ (February)]

неустойчивом состоянии атмосферы. Существенным признаком устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы является отличие зависимостей профиля ветра воздушного потока и коэффициента турбулентной диффузии как функций высоты z при том и другом состояниях атмосферы. При устойчивом состоянии атмосферы для скорости воздушного потока характерен её рост с высотой и небольшой коэффициент турбулентной диффузии. Напротив, при неустойчивом состоянии

атмосферы наблюдается иная картина – слабое изменение с высотой скорости воздушного потока $u(z)$ и значительный рост величины коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$. При устойчивом и неустойчивом состояниях атмосферы меняется и характер зависимости энергии турбулентных пульсаций: при устойчивом состоянии зависимость $b(z)$ уменьшается с ростом высоты z , а при неустойчивом растёт. Усреднённые значения указанных величин, включая масштаб приземного слоя атмосферы Монина-Обухова L и динамическую скорость V_* , приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Усреднённые характеристики метеопараметров атмосферы [Averaged characteristics of atmosphere meteorological parameters]

Месяц	U_{cp} м/с	K_{cp} м ² /с	b_{cp} м ² /с ²	L , м	V_*
январь	4,87	2,88	0,169	62,5	0,23
февраль	4,814	3,266	0,183	85	0,229
март	4,814	3,266	0,183	85	0,229
июль	4,815	14,187	1,643	-5,556	0,288
август	3,341	8,895	0,577	-8,667	0,198

Характер полученных зависимостей скорости ветра $u(z)$ (см. рис. 2) и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ (см. рис. 3) как функций высоты z для устойчивого состояния атмосферы хорошо согласуется с известными в литературе данными для указанных зависимостей при соответствующем состоянии атмосферы [3,6-7,10], что позволяет констатировать, что расчёты проведены корректно.

Затрагивая вопрос корректности расчетов, целесообразно указать на отличия в поведении рассматриваемых функций при устойчивом и

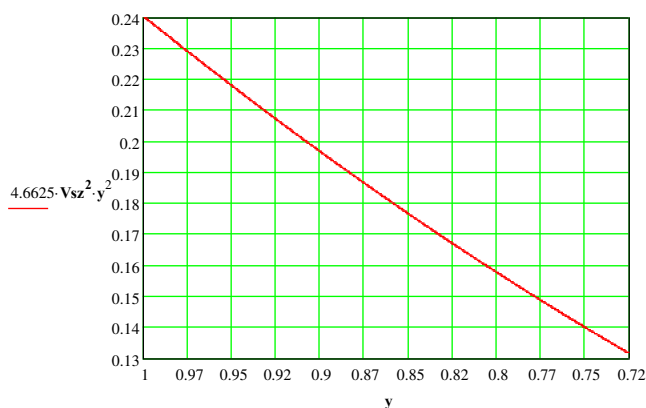


Рис. 4. – Зависимость энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, для устойчивого состояния атмосферы $L = 85$; $v^* = 0,229$ (февраль) [Dependence of turbulent pulsation energy $b(z)$, for atmosphere stable state $L = 85$; $v^* = 0.229$ (February)]

Перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии для функции $q(x, y, z)$, полагая при этом, что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса. В этом случае объёмная активность примеси определяется формулой:

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (13)$$

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение; функция $S(x, z)$ определяется выражением:

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} q(x, y, z) dy. \quad (14)$$

Таким образом, для объёмной концентрации газоаэрозольной примеси получают уравнение:

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (15)$$

где $\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) dy = M\delta(x)\delta(z - h_{эф})$;

$f = M\delta(x)\delta(y)\delta(z - h_{эф})$ – источник газоаэрозольной примеси, загрязняющий окружающую среду;

M – мощность выброса (Бк/с);

$h_{эф}$ – эффективная высота выброса;

σ – постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной загрязняющей примеси, представляющая собой постоянную вымывания примеси из атмосферы σ_0 (c^{-1}), так что $\sigma = \sigma_0$; w – гравитационная скорость осаждения примеси.

В рамках рассматриваемой модели переноса величину $\sigma_y^2(x)$ представляют в виде: $\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2/\bar{u}^2(1 + \alpha x\bar{b}/\bar{k}\bar{u})$, где \bar{b} , \bar{k} , \bar{u} – усредненные по приземному слою высотой $H_{пр} \approx 100$ м с весом $S(x, z)$ значения энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ и скорости ветра $u(z)$, $\alpha = 0,015$.

$$\bar{b} = \frac{\int_0^{H_{lim}} b(z) \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{lim}} \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{k} = \frac{\int_0^{H_{lim}} k(z) \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{lim}} \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{H_{lim}} u(z) \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{lim}} \left(\int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}.$$

Граничные условия определяются выражениями:

$$S(x, z)|_{x=0} = 0; \quad (16)$$

$$S(x, z)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (17)$$

$$S(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (18)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w)S \Big|_{z=z_0}, \quad (19)$$

где β – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность;

z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Аналитическое решение этой частной задачи (15) – (19) дается выражением (20), непосредственно объемная активность газоаerosольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (13).

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4k\bar{u}} + \frac{w(z-h_{\phi})}{2k}\right]\right) \left\{ \frac{\exp(-[z+h_{\phi}]^2 \bar{u}/4kx) + \exp(-[z-h_{\phi}]^2 \bar{u}/4kx)}{\sqrt{\pi k \bar{u} x}} - \frac{(2\beta-w)}{k\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta-w)(z+h_{\phi})}{2k} + \left(\frac{2\beta-w}{2k}\right)^2 \frac{kx}{\bar{u}}\right] \times \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2\beta-w}{2k}\right) \sqrt{kx/\bar{u}} + \frac{(z+h_{\phi})}{2\sqrt{kx/\bar{u}}}\right] \right\}, \quad (20)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчётов указанных зависимостей $u(z)$, $k(z)$ и $b(z)$ как функций высоты над подстилающей поверхностью, а также их усреднённые значения дают возможность получить осевые, поперечные распределения объёмной активности в зависимости от состояния устойчивости приземного слоя атмосферы, а также представить её общий характер.

Наглядное представление общего характера распределения объёмной активности, которая описывается формулами (13), (20), дает зависимость, представленная на рисунке 5.

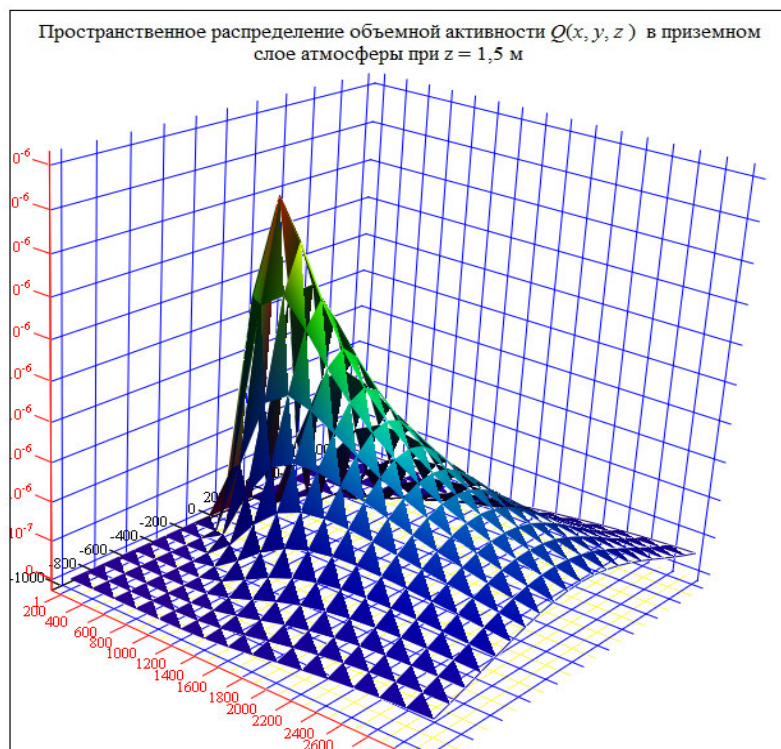


Рис. 5. – Распределение объёмной активности газоаerosольной радиоактивной примеси как функции x, y при $z = 1,5$ м [Volumetric activity distribution of a gas-aerosol radioactive impurity x, y at $z = 1.5$ m function]

К сожалению, точность такого рода распределений не всегда бывает достаточно высокой, поскольку ряд параметров, определяющих функцию распределения $S(x, z)$ (см. выражение (20)) и дисперсию $\sigma_y(x)$, содержат данные, полученные экспериментально,

т.е. с определенной погрешностью. Последнее может привести к тому, что на расстояниях от источника выброса, начиная с 10 км, точность оценки будет превышать порядок рассматриваемой величины [11]. Поэтому в условиях радиационных аварий необходимо, по возможности, уточнять состояние устойчивости атмосферы, используя более надежные технологии измерения, а также использовать радиоуправляемые беспилотные средства дозиметрического контроля типа беспилотного дозиметрического комплекса (БДК) [6], позволяющие провести как дозиметрический, так и радиометрический контроль воздушного бассейна и подстилающей поверхности в режиме реального времени.

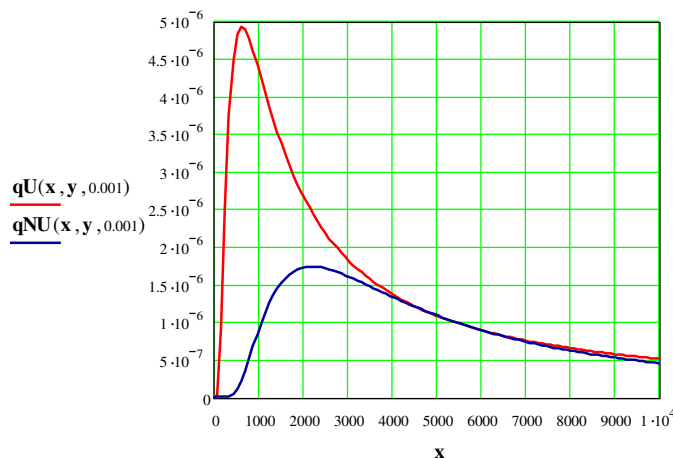


Рис. 6. – Осевые распределения выбросов объемной активности $q(x, y = 0, z = 1,5)$ газоаэрозольной радиоактивной примеси при неустойчивом состоянии атмосферы (выделено красным) и при устойчивом (выделено синим) (февраль) [The axial distributions of the volumetric activity $q(x, y = 0, z = 1.5)$ emissions of a gas-aerosol radioactive impurity at atmosphere unstable state (red) and stable (blue) (February)]

Знание величины объемной активности и характер её распределения в атмосфере позволяет получить расчетные оценки мощности дозы от объемного источника и от поверхностного загрязнения подстилающей поверхности, используя интегральные методы [12] или метод Монте-Карло [13-16] вблизи источника выбросов, или, при измеренных значениях объемной активности, получить указанные оценки в рамках концепции лучевого равновесия [17] на территории, расположенной на расстояниях от источника от 700 до 10000 м [6, 7].

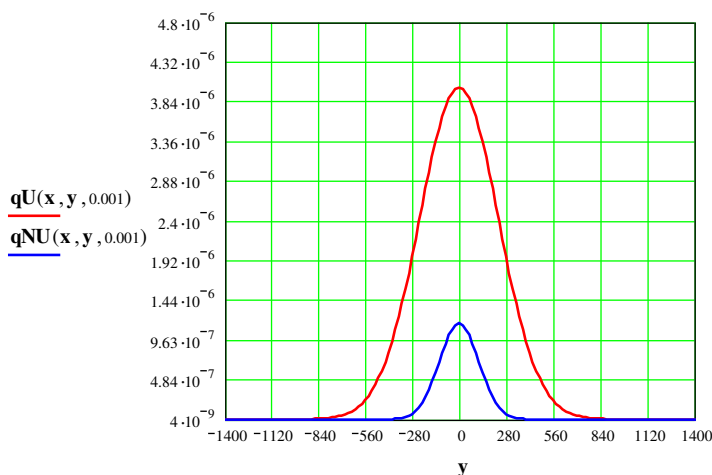


Рис. 7. – Поперечное распределение объемной активности $q(x, y = 0, z = 1,5)$ газоаэрозольной радиоактивной примеси при неустойчивом состоянии атмосферы (выделено красным) и при устойчивом (выделено синим) на расстоянии от источника $x = 1200$ м (февраль) [The transverse distribution of the volumetric activity $q(x, y = 0, z = 1.5)$ of the gas-aerosol radioactive impurity in atmosphere unstable state (red) and stable (blue) at a distance $x = 1200$ m (February)]

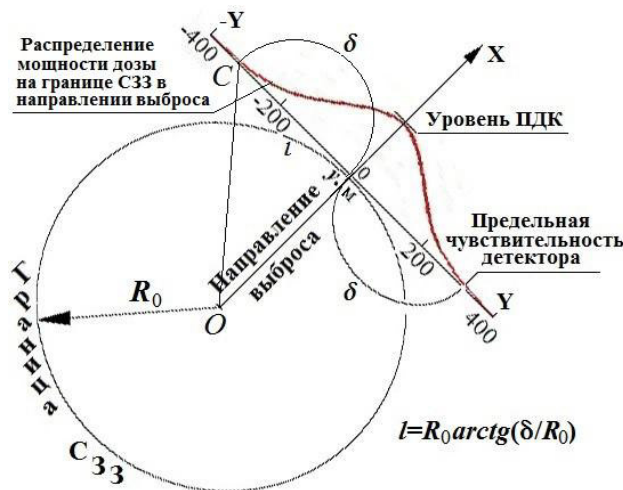


Рис. 8. – Иллюстрация выбора оптимального количества датчиков АСКРО. На оси Х0У на границе С33 в направлении выброса приведено поперечное распределение мощности дозы, создаваемой газоаэрозольной радиоактивной примесью. R_0 – радиус С33 [19] [Illustration of the choice of the optimum number of sensors ASKRO. On the X0Y axis, a transverse distribution of the dose rate produced by the gas-aerosol radioactive impurity is shown at the border of the sanitary protection zone in the direction of ejection. R_0 is the radius of the sanitary protection zone]

На рисунке 6 в рамках рассматриваемой задачи, приведены результаты расчета осевого распределения радиоактивной примеси для полученных значений состояний устойчивости атмосферы, а на рис. 7 – результаты расчетов поперечного распределения радиоактивной примеси на границе санитарно-защитной зоны (С33) радиусом $R_0 = 1200$ м. Это распределение может быть использовано для оценки необходимого и достаточного постов контроля, размещаемых вокруг АЭС, следующим образом. В соответствии с нормативным документом [18] (см. таблицу 3.1 указанного документа) на границе С33 АЭС для населения установлена годовая доза, составляющая 5 мЗв в год, которая будет определяться мощностью дозы 0,57 мкЗв/ч или 57 мкР/ч. Принимая, что максимум того или другого распределений, приведённых на рис. 7, соответствует этой величине, а предельная чувствительность

стандартного γ -детектора составляет $P_{пр} = 10$ мкР/ч, найдем, используя линейную интерполяцию для каждой из приведённых зависимостей, что для неустойчивого состояния атмосферы величина $P_{пр}$ может быть зарегистрирована на расстоянии $\delta_{н\text{у}} = 420$ м от оси выброса, а для устойчивого – $\delta_{\text{уст}} = 224$ м. Далее для оценки необходимого и достаточного количества датчиков, размещаемых вокруг АЭС, воспользуемся иллюстрацией, приведенной на рис. 8. Определяя величиной δ расстояние, на котором γ -детектор регистрирует $P_{пр}$ от газоаэрозольной примеси, поперечное распределение которой описывается той или иной кривой на рис. 7, характерной для того или иного состояния атмосферы, найдем длину дуги l , отсекаемую на окружности радиуса R_0 сектором, тангенс которого равен (δ/R_0) . Тогда длина дуги определится несложной формулой [19, 20]:

$$l = R_0 \arctg\left(\frac{\delta}{R_0}\right) \tag{21}$$

При этом необходимое число датчиков, размещаемых вокруг АЭС при неустойчивом или устойчивом состояниях атмосферы, полагая, что любое азимутальное направление выброса из 2π является равновероятным, отбрасывая мантиссу, найдём как отношение:

$$N_n = \pi R_0 / l = \pi / \arctg(\delta/R_0), \tag{22}$$

а минимальное достаточное: $N_d = N_n + 1$.

Подставляя соответствующие значения δ для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы, находим: $N_{д,н\text{у}} = 10$, $N_{д,\text{уст}} = 18$. Выбирая наиболее худший

вариант, можно констатировать, что для АЭС «Бушер» минимально достаточное число постов контроля составляет 18. При этом модель, согласно которой осуществлялась оценка числа постов, предполагает их размещение по периметру СЗЗ с равномерным их распределением по азимуту.

3. ОБСУЖДЕНИЕ



Рис. 9. – Расстановка постов АСКРО на АЭС «Бушер» 1-го блока [9] [Arrangement of ASKRO posts at Unit 1 Bushehr NPP]

К размещению постов контроля в СЗЗ предъявляют экономические, экологические, демографические требования и физические критерии [19, 20].

Экономические требования сводятся к ограничению числа постов (датчиков), что обусловлено высокой стоимостью линий связи, оборудования (датчиков, приемопередающих информацию устройств, систем персональных ЭВМ), зарплатой обслуживающего персонала, затратами на социальные нужды и т.д.

Экологические требования сводятся к обеспечению высокой степени информативности об уровнях загрязнения окружающей среды при любом направлении выброса, чего можно достигнуть увеличением числа постов контроля на промышленной площадке и в СЗЗ [21].

Демографические – определяются критерием численности населения: пост контроля совместно с информационным табло общего пользования, на котором обычно выводится информация текущего времени, давления, температуры воздуха, его влажности и загрязненности. Его целесообразно устанавливать в населенном пункте с числом жителей не менее N чел., где значение N будет определяться как

социально-экономическими условиями населения населенного пункта (установка постов в населённых пунктах осуществляется за счёт финансовых средств муниципалитета), так и стремлением жителей к получению информации об уровнях экологического загрязнения окружающей среды. Противоречие экономических и экологических критериев приводит к необходимости оптимизации числа датчиков, размещаемых вокруг АЭС. Эта оптимизация оказывается возможной при использовании соответствующего физико-математического аппарата, приведённого

выше. Однако, кроме определения оптимального числа датчиков АСКРО требуется удовлетворять ещё и некоторым критериям надёжности системы в целом, что приводит к необходимости разумного увеличения их числа в СЗЗ, например, за счёт дублирования некоторого числа датчиков.

При расстановке постов радиационного контроля при пуске 1-го блока АЭС "Бушер", представленного на рисунке 9 [9], руководствовались, по-видимому, в основном демографическими критериями, поскольку посты представлены только населёнными пунктами с расстоянием от АЭС от 1600 м (Марварид) до (Хадакан) 59460 м, что не позволяет использовать результаты измерений радиационного фона, регистрируемого соответствующими детекторами, для корректировки прогностических расчётов радиационного загрязнения окружающей среды при возникновении радиационной аварии на АЭС «Бушер». О равномерности азимутального распределения говорить вообще не приходится, поскольку он вообще отсутствует. Орография подстилающей поверхности (рельеф местности) значительно изменяется, что предъявляет весьма жесткие требования к программному обеспечению, осуществляющему прогностические оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды при возникновении радиационной аварии.

Таким образом, в случае возникновения радиационной аварии на АЭС «Бушер» систему постов радиационного контроля, представленную на рис. 9, невозможно использовать для корректировки прогностических расчётов с целью их уточнения, что указывает на крайнюю ограниченность системы АСКРО при таком методе размещения её постов радиационного контроля.

Рассмотренный выше принцип размещения постов контроля в СЗЗ (равномерно по азимуту и по периметру границы СЗЗ) целесообразен лишь при условии, что примеси при штатной работе или аварийной ситуации выбрасываются из вентиляционных труб АЭС. В этом случае наиболее важные параметры выброса, такие, как начальные температура T_0 и давление P_0 струи, мощность выброса P_v , радионуклидный состав примесей или спектральный γ -излучения, могут быть измерены специальными датчиками или их совокупностью, установленными в устье венттрубы.

Иная ситуация возникает при несанкционированном выбросе примесей в виде перегретой газовой струи из отверстий, клапанов, неплотностей сосудов, рваных отверстий или щелей, возникающих в случае взрыва или разрыва резервуаров, находящихся под высоким давлением и высокой температурой [6, 7, 21, 22]. В этом случае экспериментально почти невозможно определить ни параметры струи, выбрасываемой из отверстий, ни объемную активность примесей, ни их радиационные характеристики, поскольку не известен спектр или средняя энергия γ -излучения, и, в конечном итоге, невозможно определить масштабы загрязнения окружающей среды и оценить экологические последствия загрязнения, так как подобные аварии являются крайне редкими и не могут быть прогнозируемыми. Разработка же универсальной аппаратуры, которую можно было бы использовать для определения указанных параметров и характеристик в любых ситуациях, – задача почти невыполнимая и, кроме того, может привести к резкому удорожанию АЭС.

Тем не менее, радиоактивное загрязнение окружающей среды в случае мощного нестационарного импульсного выброса примесей через отверстия может быть успешно оценено при использовании показаний технологических датчиков, устанавливаемых в резервуарах и определяющих температуру и давление среды, и показаний датчиков АСКРО, определяющих мощность дозы внешнего облучения от радиоактивного облака, образовавшегося в результате выброса. При этом датчики на промплощадке (ПП) и в СЗЗ должны быть расположены по определенному правилу, которое требует, чтобы расстояние от возможного источника радиационной опасности (АЭС) до любого

датчика было строго различно [11, 21-23].

Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть в общем случае выражение для мощности дозы в точках $P_{ijk} = P(x_i, y_j, z_k)$, расположенных на подстилающей поверхности, от объемного источника (облака) с распределением объемной активности в нем $q(x, y, z)$:

$$D'_{i,j,k} = D'(x_i, y_j, z_k) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \alpha(E) \mu_a(E) \rho(E) E \int_V q(x, y, z) [B(E, R)/R^2] \exp[-\mu(E)R] dv dE, \quad (23)$$

где $\alpha(E)$ – зависимость чувствительности детектора от энергии γ -излучения примесей в облаке;

$\mu_a(E), \mu(E)$ – линейные коэффициенты поглощенной энергии ослабления γ -излучения в воздухе соответственно;

$B(E, R) = 1 + a(E)\mu R \exp[b(E)\mu R]$ – фактор накопления;

$a(E), b(E)$ – известные функции энергии [24];

$\rho(E)$ – подлежащий определению дифференциальный спектр γ -излучения примесей;

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_k)^2};$$

x, y, z – текущие координаты;

x_i, y_j, z_k – координаты датчиков АСКРО;

V – область интегрирования и $dv = dx dy dz$.

Предполагая кратковременность выброса, можно пренебречь его смещением относительно оси симметрии. Требование кратковременности существенно упрощает метод оценки мощности дозы, создаваемой облаком, тогда как оценка мощности дозы в динамическом режиме распространения требует учета не только деформации облака, но и учета метеорологических факторов атмосферы, особенностей подстилающей поверхности и т.д.

Координаты центра масс облака определим следующим образом:

$$x_0 = \int_V xq(x, y, z) dv / Q_v; \quad y_0 = \int_V yq(x, y, z) dv / Q_v; \quad z_0 = \int_V zq(x, y, z) dv / Q_v; \quad Q_v = \int_V q(x, y, z) dv.$$

Полагая, что расстояние от точки центра масс до любого поста контроля АСКРО

$$R_{i,j,k} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_k)^2}$$

значительно больше характерного размера облака, объемную активность $q(x, y, z)$ представим в виде:

$$q(x, y, z) = Q_v \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (24)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция.

Проводя в уравнении (23) интегрирование по объему с $q(x, y, z)$ вида (24), получаем:

$$D'(R_{i,j,k}) = Q_v \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \alpha(E) \mu_a(E) [B(E, R_{i,j,k}) / R_{i,j,k}^2] \exp[-\mu(E)R_{i,j,k}] \rho(E) E dE, \quad (25)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, N_d$; N_d – достаточное число датчиков системы АСКРО.

Уравнение (25) относительно $\varphi(E)$ представляет собой уравнение Фредгольма первого рода и относится к классу некорректных задач при заданной погрешности измерения датчиков. Нетривиальное решение уравнения (25) возможно, если $R_{ijk} \equiv R_i$; $R_i \neq R_{i+1} \neq R_{i+2} \neq \dots \neq R_{N_d}$; $i = 1, 2, \dots, N_d$.

Уравнение решают заменой $\varphi(E)$ групповым спектром, аппроксимацией интеграла конечной суммой и, таким образом, при различных i задачу сводят к системе линейных алгебраических уравнений, т.е. решают систему вида [6,7]:

$$\hat{A}\vec{\varphi} = \vec{D}, \tag{26}$$

где \hat{A} – матрица $N_d \times M$ ($N_d > M$) матричным элементом, равным:

$$a_{i,j} = a(E_j)\mu_a(E_j)\{1 + a(E_j)\mu(E_j)R_i \exp[b(E_j)\mu(E_j)R_j]\} \exp[-\mu(E_j)R_i]E_j \Delta E,$$

$\vec{\varphi}$ – вектор искомого решения с компонентами φ , $j = 1, 2, 3, \dots, M$;

\vec{D} – заданный вектор результатов измерений с компонентами $D_i = D(R_i)R_i^2/Q_V$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_d$.

Для проверки методов расчета φ_j используют так называемый метод «бумажного эксперимента»: задают исходный спектр $\varphi_{\text{апр}}(E)$, затем по уравнению (25) находят значения $D(R_i)$, которые искажают в пределах погрешности реальных показаний датчиков (15-25%), после чего решают обратную задачу определения φ_j . Из представленных в табл. 3 результатов решения уравнения (26) следует, что исходный и восстановленный спектры удовлетворительно согласуются, там же, наряду с удовлетворительными решениями, приведено решение системы линейных алгебраических уравнений, полученное тривиальным обращением матрицы (неудовлетворительное решение): $\vec{\varphi} = (\hat{A}^* \cdot \hat{A})^{-1} \vec{b}$, где \hat{A}^* матрица, сопряженная \hat{A} ; $(\hat{A}^* \cdot \hat{A})^{-1}$ – обратная матрица размером $M \times M$; $\vec{b} = \hat{A}^* \cdot \vec{D}$ – вектор.

Таблица 3. – Сравнение исходного $\varphi_{\text{апр}}$ и восстановленных Спектров [6,7] [Comparison of the original $\varphi_{\text{апр}}$ and the reconstructed Spectra]

Энергия E_j (МэВ)	Априорный φ_j	φ_j , Вычисленный методом		
		Fabian H.U.	Тихонов А.Н.	Обр. matr.
0,37	1,768	1,784	1,851	-0,088
0,748	0,503	0,731	0,671	0,0
1,1216	0,328	0,149	0,137	-0,802
1,496	$7,36 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$
1,87	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$	2,8434

Условие ($R_{ijk} \neq R_i$; $R_i \neq R_{i+1} \neq R_{i+2} \neq \dots \neq R_{N_d}$; $i = 1, 2, \dots, N_d$) накладывает определенные требования на размещение постов контроля: при размещении датчиков мощности дозы (АСКРО) не должно быть осевой и центральной симметрии, поскольку в противном случае число уравнений (25) или (26), отличающихся правой частью, уменьшится в 2 или 4 раза (при осевой симметрии) или приведет к полному вырождению системы линейных алгебраических уравнений (при размещении датчиков

по периметру СЗЗ, т.е. при центральной симметрии). Кроме того, как уже отмечалось, размещение датчиков по периметру зоны позволяет надежно регистрировать факел выброса или распространение облака при любом направлении ветра.

Учет этих двух противоречивых требований приводит к тому, что R_i постов контроля должны возрасти с увеличением азимутального угла, отсчитываемого от какого-либо направления (например, как в спирали Архимеда). Графики таких кривых приведены на рис. 10 и представляют собой либо гладкую кривую, для которой R_i является функцией угла, $R_i = R_0\theta_i$, $\theta_i = i\Delta\theta$; $i = 1, 2, \dots, N_d$; $\Delta\theta = 2\pi/N_d$, либо многолучевую звезду [6].

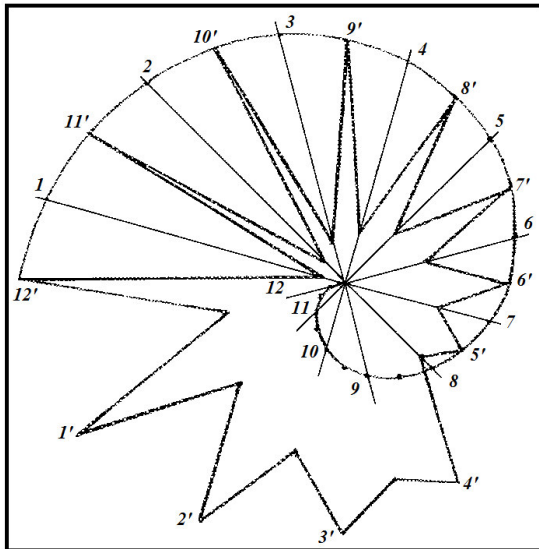


Рис. 10. – Принцип расстановки постов контроля в СЗЗ [22] [The principle of placing control posts in the sanitary protection zone]

Гистограммы спектров представляют собой следующее: 1 – исходный $\varphi(E)_{\text{апр}}$ ($E_{\text{ср}} = 0,497$ МэВ); 2 – восстановленный с использованием метода N. Scofield (a – возрастающий спектр, $E_{\text{ср}} = 0,5104$ МэВ, 500 итераций); (b – «горбатый» спектр, $E_{\text{ср}} = 0,4939$ МэВ, 2500 итераций); (c – убывающий спектр, $E_{\text{ср}} = 0,3519$ МэВ, 12500 итераций).

Таблица 4. – Сравнение исходного $\varphi_{\text{апр}}$ и восстановленных спектров [6] [Comparison of the original $\varphi_{\text{апр}}$ and the reconstructed Spectra]

Индекс j	Энергия E_j , МэВ	Спектр $\varphi(E_j)$						
		Априорный φ_j	$E_{\text{ср}}$, МэВ	вычисленный методом				Метод обратной матрицы
				Y.Su	$E_{\text{ср}}$, МэВ	N. Scofield	$E_{\text{ср}}$, МэВ	
1	0,25	2,359	0,458	1,722	0,460	1,573	0,457	19,285
2	0,364	1,618		1,070		1,332		-33,735
3	0,497	1,178		1,269		1,123		28,269
4	0,605	0,638		0,939		0,972		-8,819

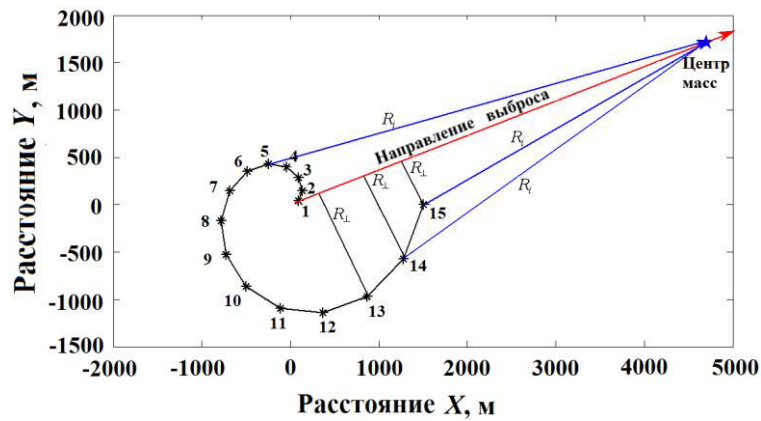


Рис. 11. – Иллюстрация оценки спектрального состава гамма-излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником [6] [Illustration of spectral composition estimation of gamma radiation from the emission flare, which is approximated by linear source]

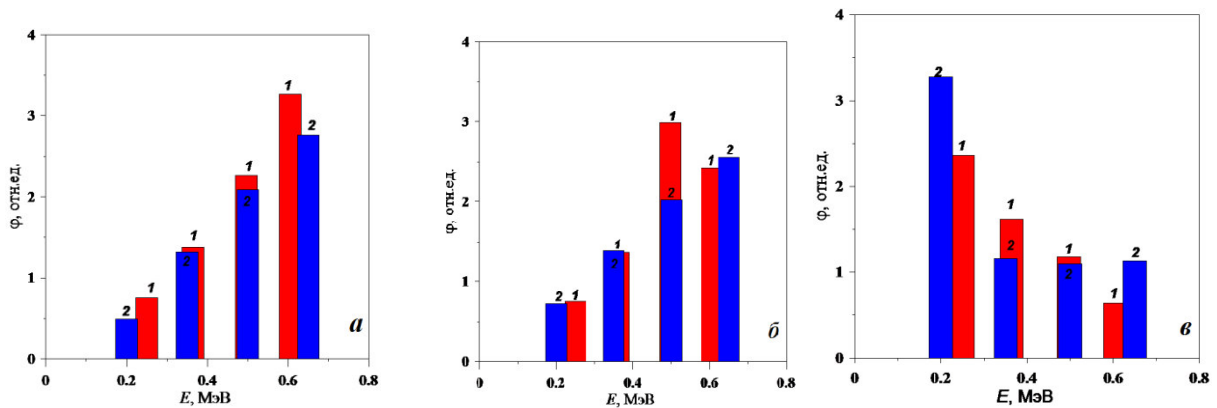


Рис. 12. – Результаты расчётов восстановления спектрального состава гамма-излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником для трёх видов спектра гамма-излучения: а – возрастающий; б - «горбатый»; в - убывающий спектр [6] [The calculation results of spectral reconstruction of gamma radiation from the emission flare, which are approximated by linear source for three types of gamma-ray spectrum: a is increasing; b is "hunchbacked"; c is a decreasing spectrum]

Восстановленные спектры дают возможность определить среднюю энергию фотонного излучения радиоактивной примеси, формирующей радиоактивное облако, что, в свою очередь, позволяет оценить дозовые нагрузки на персонал и население. Средняя энергия есть интегральная величина, определяемая выражением:

$$E_{cp} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} E\varphi(E)dE / \int_{E_{min}}^{E_{max}} \varphi(E)dE. \tag{27}$$

Следует отметить, что знание этой величины позволяет существенно упростить расчетные оценки дозовых нагрузок на персонал и население, поскольку, в противном случае расчеты указанных величин следовало бы проводить для каждой энергии фотонов радионуклидов, учитывая для каждого из них схему распада.

Сравнение средней энергии восстановленных и априорного спектров показывает удовлетворительное согласие относительно средней энергии E_{cp} (табл. 4). Относительная погрешность расчетов составляет менее 1 % [6]. На рисунке 13 представлены зависимости погрешности средней энергии, восстанавливаемые методом N. Scofield спектров γ -излучения в виде кривых итерационного процесса при оценки сходимости величины средней энергии E_{cp} .

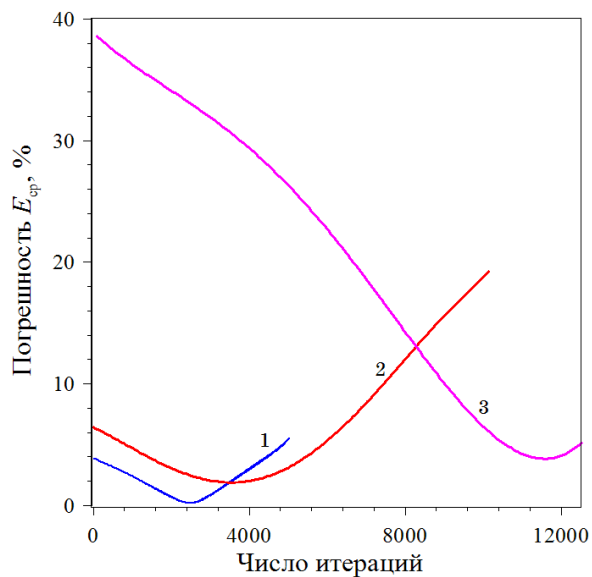


Рис. 13. – Условие сходимости итерационного процесса при восстановлении спектрального состава γ -излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником для трёх видов спектра γ -излучения: 1 – возрастающего; 2 – «горбатого»; 3 – убывающего [6] [The condition for the iterative process convergence when the spectral composition of gamma radiation is restored from the emission flare, which is approximated by a linear source for three types of γ -radiation spectrum: 1 is increasing; 2

4. ПРИНЦИП РАЗМЕЩЕНИЯ ПОСТОВ АСКРО ДЛЯ ДВУХ И БОЛЕЕ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

Рассмотренный выше метод размещения постов контроля целесообразен для одного блока АЭС, но недостаточен для двух или более, поскольку, размещая на каждом блоке систему γ -датчиков указанным выше способом, мы можем получить дублирование датчиков на каком-то направлении, что в итоге может привести к их избыточности или далеко не оптимальному количеству.

Для оптимизации числа датчиков, расположенных между блоками АЭС, предварительно на каждом блоке их расставляют по спирали Архимеда (кривые 1 и 2 на рис. 14) и находят точки пересечения двух семейств прямых, проходящих через источники выбросов и датчики, расположенные на кривых [6].

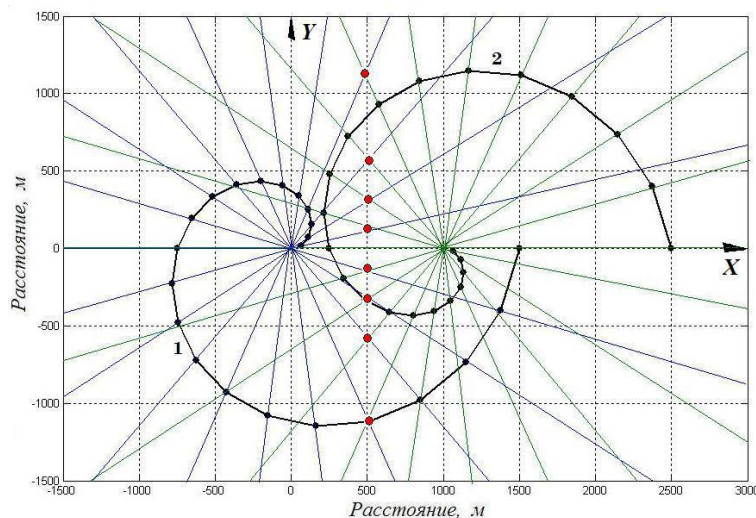


Рис. 14. – Метод расстановки постов контроля для двух энергоблоков АЭС [6] [The method of arranging control posts for two power units of nuclear power plants]

Затем находят дублирующие точки на выделенных направлениях. При этом датчики, дублирующие друг друга, расположенные на кривых, для экономии финансовых и материальных средств можно отбросить (см. перечеркнутые точки на рис. 15), а точки, находящиеся на пересечении двух семейств прямых, определяют необходимое число датчиков, которое следует установить между блоками АЭС, и их координаты (см. вертикально расположенные точки на рис. 14 и 15).

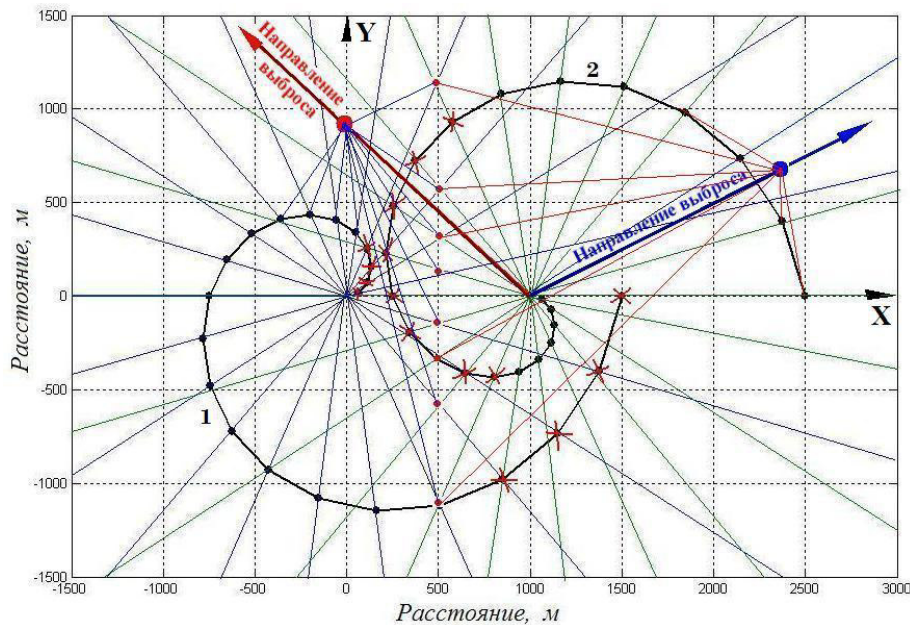


Рис. 15. – Метод расстановки постов контроля для двух энергоблоков: выделение дублирующих датчиков системы АСКРО [6] [The method of arranging control posts for two power units: allocation of duplicate sensors of the ASCRO system]

Семейство прямых, характеризующих кривую 1 (спираль Архимеда) определяется уравнением:

$$y_i^{(1)} = x \cdot \operatorname{tg}(\varphi), \tag{28}$$

где $\varphi = i \cdot \Delta\varphi, i = 1, 2, \dots, m;$

$\Delta\varphi = 2\pi/N_d, N_d$ – достаточное число датчиков системы АСКРО, располагающихся вокруг одного блока АЭС, чтобы при любом азимутальном угле выброса радиоактивной примеси в атмосферу факел выбросов мог быть зарегистрирован при сильно устойчивом метеорологическом состоянии атмосферы (категории F или G модели Пасквилла–Гиффорда) [6] или при высоком значении параметра приземного слоя атмосферы $L > 0$.

Кривые 1 и 2 описываются уравнением $R = R_0\varphi$. Значение R_0 выбирают из условия $R_{\max} = R_0 \cdot 2\pi$. Откуда следует $R_0 = R_{\max}/2\pi$. В качестве R_{\max} принимают $R_{\max} = 1500,0$ м – расстояние от источника выбросов с общей активностью $Q = 5 \cdot 10^6$ Ки, расположенного на высоте $h = 100$ м, на котором источник создает мощность эквивалентной дозы фотонного излучения, сравнимую с естественным фоном.

Семейство прямых, характеризующих кривую 2, определяется уравнением:

$$y_i^{(2)} = (x_0 - x)\operatorname{tg}(\varphi), \tag{29}$$

где x_0 – расстояние между источниками возможных выбросов радиоактивной примеси в атмосферу.

В точках пересечения семейства прямых $y_i^{(1)} = y_i^{(2)}$, а значение абсциссы точек пересечения не зависит от φ (индекса i) и равно:

$$x = x_0/2. \quad (30)$$

Напротив, значения ординат точек пересечения семейств прямых зависят от угла φ (индекса i) и определяются выражением:

$$y_i^{(1)} \equiv y_i^{(2)} = \frac{x_0}{2} \operatorname{tg}(\varphi) = 0,5x_0 \operatorname{tg}(i \cdot \Delta\varphi), \quad (31)$$

где в соответствии с рис. 14 и 15, $i = \pm 1, 2, 3, 4$.

При определении максимальной ординаты датчиков значения индекса i должно быть ограничено так, чтобы выполнялось условие:

$$\sqrt{(y_i^{(1)})^2 + (0,5x_0)^2} \leq R_{\max}. \quad (32)$$

После построения системы датчиков АСКРО, удовлетворяющих требованиям для каждой из систем дублирующие друг друга датчики, в целях экономии финансовых и материальных средств, можно отбросить (см. перечеркнутые точки на рисунке 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Окончательная картина размещения датчиков АСКРО для двух блоков АЭС приведена на рисунке 16. Стрелками на рисунке указаны гипотетические направления выбросов радиоактивной примеси в атмосферу на одном из источников. Крупные точки на выделенных направлениях представляют собой центр масс радиоактивного выброса, распространяющегося в данном направлении. Прямые, соединяющие центры масс с γ -датчиками АСКРО указывают на систему опроса показаний датчиков, которые (показания) затем используются для определения спектра и средней энергии фотонного излучения радиоактивной примеси, распространяющейся по ветру.

Если система АСКРО строится для трех блоков* АЭС, расположенных на одной прямой (как показывает практика), то решается аналогичная задача для второго и третьего блоков АЭС путем трансляции (перемещением) кривой 1 по оси X с размещением источника выбросов на расстоянии x_0 от второго источника и т.д.

В случае выброса радиоактивной примеси в атмосферу в условиях радиационной аварии на АЭС с заданными, например, левым или правым направлениями, система

* Если рассматривать конкретный случай АСКРО 2-го и 3-го блоков АЭС Бушер, то рекомендации здесь сводятся к следующему. Поскольку расстояние между вторым и третьим блоками небольшое и составляет всего порядка 300 м с небольшим, то геометрический центр источника возможных радиоактивных выбросов целесообразно разместить посередине между ними. Тогда задача размещения постов контроля сводится в точности к вышеизложенной. Если посты радиационного контроля в этом случае будут размещаться на зданиях, то размещать их следует таким образом, чтобы исключить экранирование детектора более высоким зданием, расположенном по направлению луча, проведенного из устья венттрубы до рассматриваемого детектора, или же приподнять детектор на определенную высоту, чтобы исключить подобный эффект.

АСКРО (в соответствии с рис. 16) опрашивает все датчики, регистрируя их показания, определяет состояние устойчивости атмосферы для уточнения условий рассеяния радиоактивной примеси, определяет радионуклидный состав радиоактивной примеси, используя показания спектрометрического оборудования или в случае его отказа – показания датчиков АСКРО, определяет спектр и среднюю энергию фотонного излучения и прогнозирует радиоактивное загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на персонал и население, обеспечивая, таким образом, руководство АЭС предварительной информацией для принятия соответствующего решения, позволяющего минимизировать последствия радиационной аварии.

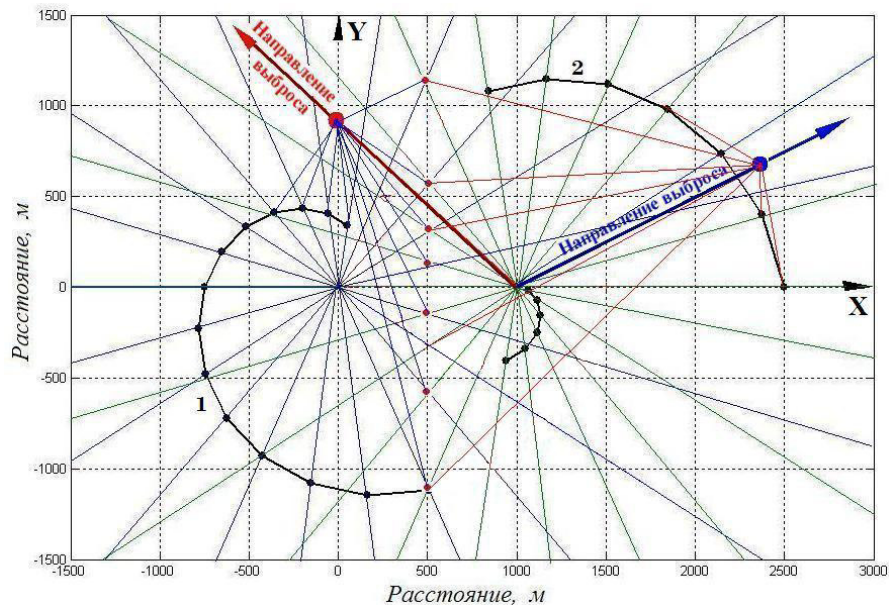


Рис. 16. – Принципиальная схема размещения γ -датчиков системы радиационного контроля АСКРО для двух энергоблоков АЭС. Стрелками указаны гипотетические направления выбросов радиоактивной примеси в атмосферу на одном из источников. Крупные точки на выделенных направлениях представляют собой центр масс радиоактивного выброса, распространяющегося в данном направлении. Прямые, соединяющие центры масс с γ -датчиками АСКРО, указывают на систему опроса показаний датчиков, которые (показания) затем используются для определения спектра и средней энергии фотонного излучения радиоактивной примеси, распространяющейся по ветру [6] [The basic scheme for the placement of γ -sensors of the radiation monitoring system ARMS for two power units of nuclear power plants. Arrows indicate the hypothetical directions of emissions of radioactive impurities into the atmosphere at one of the sources. The large points on the selected directions represent the center of radioactive ejecta mass propagating in this direction. The straight lines connecting the centers of mass with the ARMS γ -sensors indicate a system for interrogating the readings of the sensors, which are then used to determine the spectrum and average energy of the photon radiation of a radioactive impurity propagating downwind]

РЕКОМЕНДАЦИИ

Работа может представлять интерес для работников атомной промышленности, занимающихся эксплуатацией Атомных электростанций, научных сотрудников проектных организаций, разрабатывающих проекты автоматизированных систем типа АСКРО для работников предприятий металлургической и химической промышленности, занимающихся вопросами охраны окружающей среды, экологов и других специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елохин, А.П. и др. Принципы расстановки постов радиационного контроля в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения АЭС "Бушер" [Текст] / А.П. Елохин, Н.М. Власкин // Экологические системы и приборы. – 2004. – №6. – С. 40–46.
2. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения [Текст]. М.: «МХО Интератомэнерго», 1992. – 334 с.
3. Лайхтман, Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
4. Елохин, А.П. и др. Оценка материальных затрат при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности при радиационной аварии на ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №3(20). – С. 7–34.
5. Елохин, А.П. и др. Некоторые оценки материальных затрат при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате радиационной аварии на ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // The XIIth International Conference Science and Education. 1-2 июля 2016 г., Мюнхен, Германия. – Мюнхен, 2016. – С. 55–81.
6. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ» [Текст] / А.П. Елохин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
7. Елохин, А.П. Оптимизация методов и средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин : дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИФИ. – 2001. – 325 с.
8. Типовое содержание плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на атомной станции (НП - 015-12). Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 18 сентября 2012 г. №518 [Текст].
9. Компания по производству и развитию атомной энергии Ирана. АЭС «Бушер-2» [Текст]. Энергоблоки 2,3. Том 4. Инженерно-гидрологические изыскания. Книга 1. Аэрометеорологические работы и исследования. 2015. – 235 с.
10. Бобылева, М.М. Расчет характеристик турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы [Текст] / М.М. Бобылева // Труды Ленинградского Гидрометеорологического института. Вып. 40 (Некоторые вопросы физики пограничного слоя в атмосфере и море). – Л., 1970. – С. 64–73.
11. Елохин, А.П. и др. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РБ – 053–09. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.06.2010 г. № 465. – 79 с.
12. Метеорология и атомная энергия [Текст] / Пер. с англ. Под ред. Н.Л. Бызовой и К.П. Махонько. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 618 с.
13. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений [Текст] / Под ред. чл.-корр. АН СССР Г.И. Марчука. – М.: Атомиздат, 1967. – 256 с.
14. Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. Nukleonik, 1964, Vol. 6. p. 14.
15. Золотухин, В.Г. и др. Поле излучения точечного мононаправленного источника гамма-квантов [Текст] / В.Г. Золотухин, Л.Р. Кимель, А.И. Ксенофонтов и др. – М.: Атомиздат, 1974. – 160 с.
16. Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
17. Гусев, Н.Г. и др. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
18. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [Текст].
19. Елохин, А.П. и др. К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4(17). – С. 15–34.
20. Elokhin Alexander P., Starodubtcev Iliia A. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to

Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management. (USA) 2017, Issue 26, №2, pp. 23–43.

21. Елохин, А.П. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А. П. Елохин. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.
22. Елохин, А.П. Принципы размещения датчиков мощности дозы вокруг АЭС [Текст] / А.П. Елохин // Атомная энергия. – 1994. - Т. 76. – Вып. 3. – С. 188–193.
23. Елохин, А.П. и др. Система контроля радиационной обстановки в зонах размещения объектов атомной промышленности. РФ патент на изобретение № 2042157 20.08.96 бюл. №23 [Текст] / А.П. Елохин, Д.Ф. Рау. – 1996. – С. 230–231.
24. Машкович, В.П. и др. Защита от ионизирующих излучений. Справочник [Текст] / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

REFERENCES

- [1] Elokhin A.P., Vlaskin N.M. Printsipy rasstanovki postov radiatsionnogo kontroiya v sanitarnozashchitnoi zone i zone nabliudeniya AES "Bushehr" [The Principles of Placing Radiation Control Posts in the Sanitary Protection Zone and the Observation Zone of the Bushehr NPP]. Ekologicheskie sistemy i pribory [Ecological Systems and Devices], 2004, №6, pp. 40–46. (in Russian)
- [2] Metody rascheta rasprostraneniya radioaktivnykh veshchestv v okruzhaiushchei srede i doz oblucheniya naseleniya [Methods for Calculating the Spread of Radioactive Substances in the Environment and Doses to the Public]. M. Pub. «MKhO Interatomenergo», 1992, 334 p. (in Russian)
- [3] Laikhtman D.L. Fizika pogranichnogo sloia atmosfery [Physics of the Boundary Layer of the Atmosphere]. Leningrad. Pub. Gidrometeorologicheskoe, 1970, 340 p. (in Russian)
- [4] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. Otsenka materialnykh zatrat pri likvidatsii posledstviy radioaktivnogo zagriazneniya podstilaiushchei poverkhnosti pri radiatsionnoi avarii na OIAE [Assessment of Material Costs in the Liquidation of Radioactive Contamination Consequences of the Underlying Surface during a Radiation Accident at the OIAE]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №3(20), pp. 7–34. (in Russian)
- [5] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. Nekotorye otsenki materialnykh zatrat pri likvidatsii posledstviy radioaktivnogo zagriazneniya okruzhaiushchei srede v rezul'tate radiatsionnoi avarii na OIAE [Some Estimates of Material Costs during the Liquidation of Environment Radioactive Contamination Consequences as a Result of a Radiation Accident at the OIAE]. The XIIth International Conference Science and Education. 1-2 iyuiya 2016 g., Miunkhen, Germaniya. Miunkhen, 2016, pp. 55–81. (in Russian)
- [6] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiatsionnogo kontroiya okruzhaiushchei srede [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2014, 520 p. (in Russian)
- [7] Elokhin A.P. Optimizatsiya metodov i sredstv avtomatizirovannykh sistem kontroiya radiatsionnoi obstanovki okruzhaiushchei srede [Optimization of Methods and Means of the Automated Control Systems of Environment Radiation Situation]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [The thesis for the Doctor of Engineering degree]. M. Pub. MIFI [MEPhI], 2001, 325 p. (in Russian)
- [8] Tipovoe sodержanie plana meropriyatii po zashchite personala v sluchae avarii na atomnoi stantsii (NP - 015-12). Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii. Utverzhdeny prikazom Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 18 sentiabria 2012 g. №518 [Typical Content of the Action Plan for Personnel Protection in the Accident at Nuclear Power Plant (NP - 015-12). Federal Rules and Regulations in the Field of Use of Atomic Energy. Approved by the order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of September 18, 2012 № 518]. (in Russian)
- [9] Kompaniya po proizvodstvu i razvitiyu atomnoi energii Irana. AES «Bushehr-2». Energobloki 2,3. Tom 4. Inzhenerno-gidrologicheskie izyskaniya. Kniga 1. Aerometeorologicheskie raboty i issledovaniya [Company for the Production and Development of Nuclear Energy in Iran. Bushehr-2 NPP. Power units 2,3. Volume 4. Engineering and Hydrological Surveys. Book 1. Aerometeorological Work and Research.]. 2015, 235 p. (in Russian)
- [10] Bobyleva M.M. Raschet kharakteristik turbulentnosti v planetarnom pogranichnom sloe atmosfery. Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo instituta. Vyp. 40 (Nekotorye voprosy fiziki pogranichnogo sloia v atmosfere i more) [Calculation of the Turbulence Characteristics in the Planetary Boundary Layer of the Atmosphere. Proceedings of the Leningrad Hydrometeorological

- Institute. Issue. 40 (Some issues of the Physics of the Boundary Layer in the Atmosphere and the Sea)]. Leningrad, 1970, pp. 64–73. (in Russian)
- [11] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh otsenok radiatsionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagiazneniya okruzhaiushchei sredy i dozovykh nagruzok na personal i naselenie. Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru RB – 053–09. Utverzhdeno prikazom Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 08.06.2010 g. №465 [Provision on Increase in Accuracy of Predictive Estimates of Radiation Characteristics of Radioactive Environmental Pollution and Dose Loads of Personnel and Population. The Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation, Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of RB – 053 – 09. Approved by the order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 08.06.2010 №465], 79 p. (in Russian)
- [12] Meteorologiya i atomnaya energiya [Meteorology and Nuclear Energy.]. Perevod s angliiskogo, pod redaktsiei N.L. Byzovoi i K.P. Makhonko [Trans. from English. Edited by N.L. Byzova and K.P. Mahonko]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat, 1971, 618 p. (in Russian)
- [13] Metod Monte-Karlo v probleme perenosa izlucheniia [The Monte Carlo Method in the Problem of Radiation Transfer.]. Pod redaktsiei chlena-korrespondenta AN SSSR G.I. Marchuka [Edited by G.I. Marchuk]. M. Pub. Atomizdat, 1967, 256 p. (in Russian)
- [14] Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. Nukleonik, 1964, Vol. 6. p. 14. (in English)
- [15] Zolotukhin V.G., Kimel L.R., Ksenofontov A.I. i etc. Pole izlucheniya tochechnogo mononapravlennoogo istochnika gamma-kvantov [The Radiation Field of a Point Monodirectional Source of Gamma Quanta]. M. Pub. Atomizdat, 1974, 160 p. (in Russian)
- [16] Sobol I.M. Chislennye metody Monte-Karlo [Numerical Monte Carlo Methods]. M. Pub. Nauka [Science], 1973, 311 p. (in Russian)
- [17] Gusev N.G., Beiyayev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere. Spravochnik [Radioactive Emissions in the Biosphere: a reference book]. M. Pub. Energoatomizdat, 1986, 224 p. (in Russian)
- [18] Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiatsionnoi bezopasnosti» (NRB-99/2009) [Sanitary Rules and Regulations. SanPiN 2.6.1.2523-09 "Norms of Radiation Safety"]. (in Russian)
- [19] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. K voprosu ob ispolzovanii avtomatizirovannykh sistem kontroiya ekologicheskoi obstanovki na territoriyakh, privilegiiushchikh k predpriyatiyam chernoi, tsvetnoi metallurgicheskoi i atomnoi promyshlennosti [Use of Automated Systems for Environmental Monitoring in the Area Surrounding Ferrous, Nonferrous Metallurgical Enterprises and Nuclear Industry]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4(17), pp. 15–34. (in Russian)
- [20] Elokhin Alexander P., Starodubtcev Ilya A. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management. (USA) 2017, Issue 26, №2, pp. 23–43. (in English)
- [21] Elokhin A.P. Avtomatizirovannyye sistemy kontroiya radiatsionnoi obstanovki okruzhaiushchei sredy [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment]. M. Pub. NIYaU MIFI, 2012, 316 p. (in Russian)
- [22] Elokhin A.P. Printsipy razmeshcheniya datchikov moshchnosti dozy vokrug AES [The Principles of Dose Rate Sensors Placement around Nuclear Power Plants]. Atomnaya energiya [Atomic Energy], 1994, Vol. 76, Issue 3, pp. 188–193. (in Russian)
- [23] Elokhin A.P., Rau D.F. Sistema kontroiya radiatsionnoi obstanovki v zonakh razmeshcheniya obiektoy atomnoi promyshlennosti. RF patent na izobretenie №2042157 20.08.96 biulleten №23 [The Monitoring System of the Radiation Situation in the Areas Where Nuclear Facilities are Located. RF patent for invention № 2042157 20.08.96 bul. №23]. pp. 230–231. (in Russian)
- [24] Mashkovich V.P., Kudriavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruiushchikh izlucheniia [Protection against Ionizing Radiation]. Spravochnik [Reference Book]. M. Pub. Energoatomizdat, 1995, 496 p. (in Russian)

Meteorological Conditions of the Bushehr NPP area, Iran

A.P. Elokhin¹, E.A. Alalem², A.I. Ksenofontov³

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹*ORCID: 0000-0002-7682-8504*

WoS ResearcherID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru ;

²*ORCID: 0000-0002-7207-5939*

WoS ResearcherID: G-9489-2017

e-mail: issaalem2@yahoo.com ;

³*ORCID: 0000-0002-6864-9805*

WoS ResearcherID: H-1833-2017

e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru

Abstract – This work considers the method of assessment of the required and sufficient number of posts of the automated radiation monitoring system (ARMS) in the sanitary protection zone of the Bushehr NPP second unit in Iran arranged around the NPP and justification of their layout.

The method is based on the data of meteorological observations in the specified region that represent the results of measurement of wind speed and temperature at different heights at the meteorological tower and methods of gradient observations over these characteristics for each month during 2006-2010.

The characteristics obtained allow to calculate atmospheric stability as part of the known model of the ground layer and the meteorological parameters that determine it – air speed, temperature, turbulence diffusivity coefficient and turbulent fluctuation energy as functions of height by solving the closed equation system describing the condition of the ground layer.

Knowledge of atmosphere meteorological parameters allows to define a problem of assessing environmental nuclear pollution by solving the equation of turbulence diffusivity in the conditions of a hypothetical radiation accident at Bushehr NPP and determine the required and sufficient number of ARMS posts and their layout around the NPP that takes into account the restricted nature of the information as to the radionuclide composition of the radioactive impurity propagating in the atmosphere in case of the accident.

This work may be of interest to nuclear industry workers engaged in the operation of nuclear power plants, research officers of design organizations that design automated systems of ARMS type for enterprises of nuclear, metal processing and chemical industries, environmental engineers, etc.

Keywords: radiation accident, meteorological characteristics, ionization radiation, environmental nuclear pollution, ionizing-radiation detectors, stable and unstable atmosphere.