

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК [621.311.25:551.5](569.5)

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА АЭС  
В ИОРДАНИИ**

© 2017 Е.А. Алалем\*, А.П. Елохин\*, А.И. Ксенофонов\*, П.И. Федоров\*\*

\* *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

\*\* *Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия*

В работе приводятся данные метеорологических характеристик района строительства АЭС в Иордании, представляющих собой измерения скорости ветра и температуры на различной высоте на метеомачте, для различных сезонов в различное время суток. Полученные характеристики дают возможность провести расчёты метеорологических параметров приземного слоя атмосферы – скорости воздушного потока, температуры, коэффициента турбулентной диффузии и энергии турбулентных пульсаций в виде функций высоты, что позволяет сформулировать задачу по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды в рамках модели приземного слоя атмосферы в условиях гипотетической аварии на АЭС в Иордании, а также провести исследования необходимого и достаточного количества детекторов ионизирующего излучения, размещаемых вокруг АЭС. Указанная модель в дальнейшем может быть использована для оперативной оценки последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды.

*Ключевые слова:* радиационная авария, метеорологические характеристики, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение окружающей среды, детекторы ионизирующего излучения.

Поступила в редакцию: 15.09.2017

В предыдущей работе [1] авторами рассматривались основные параметры района размещения проектируемой АЭС в Иордании с последующей систематизацией данных по основным характеристикам площадки, намеченной для строительства атомной электростанции. В представленной работе тема получила дальнейшее развитие, но основное внимание было уделено изучению метеорологических характеристик площадки АЭС.

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 загрязнений, их плотность, а также характер распределения 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 радиационного загрязнения на обширной территории. Газоаerosольные выбросы создают в атмосферном воздухе аэродисперсные массы, которые в результате турбулентного движения долгое время удерживаются в воздухе и выносятся 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 поглощения 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 вышке, а общий характер их зависимости как функции высоты – на основе решения замкнутой системы уравнений приземного слоя атмосферы.

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 [3-6]. 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 настоящей работе при рассмотрении сценария, обусловленного выходом радиоактивных газоаэрозольных примесей в атмосферу, производится оценка радиоактивного загрязнения воздушного пространства и подстилающей поверхности, оценка дозовых нагрузок на персонал и население региона, оказавшегося под струей радиоактивного выброса, а также приводится математическая формулировка постановки задачи и методов ее решения.

Рассматривая в качестве субстанции объемную активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, загрязняющей окружающую среду,  $q(x, y, z)$  (Ки/м<sup>3</sup>), метеопараметры атмосферы:  $u(z)$  – продольную скорость воздушного потока (поперечную скорость полагаем равной нулю),  $k(z)$  – коэффициент турбулентной диффузии и  $b(z)$  – энергию турбулентных пульсаций, определяемые, как указывалось, в рамках модели приземного слоя атмосферы, находим, используя физико-математический аппарат работы [7].

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

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;

$\theta$  – потенциальная температура  $\theta = T(1000/P)^{0,29}$  ( $T$  – температура °К;  $P$  – атмосферное давление мбар;

$\theta_n$  – ее безразмерная величина  $\theta_n = -\chi \theta / \theta_*$ ,  $\theta_* = P_0 / (\rho c_p v_*)$ ,  $P_0$  – поток тепла,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c_p$  – удельная теплоемкость);

$\alpha_T = k_T/k$  – отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения.

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3; \tag{2}$$

$$k_n = 1 - y^4, \tag{3}$$

где  $y$  – табулированное значение для различных  $z_n$ . Для безразмерных  $u_n, b_n$ , получаем следующие выражения:

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

$$b_n = y^2; \tag{5}$$

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

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

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$T_0$  – температура на уровне земли.

Уравнение (2) относительно  $y$  имеет аналитическое решение Феррари [5, 6] и зависит от  $z_n$  следующим образом:

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

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

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 [5-7]. Измеряют на двух уровнях скорость ветра и температуру, например,  $z_1 = 2H$ ,  $z_2 = 0,5H$  ( $H = 1$  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, получаем  $P_0/\rho c_p = -\chi v_* D\theta/D\theta_n$ ;

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

где  $u_n; \theta_n$  – табулированные значения универсальных функций, вычисленных для различных  $z_n$  ( $z_n = z/L$ ) [7],

$Du_n; D\theta_n$  – их разность.

Поскольку  $Du, D\theta$  – измеряемые величины, а  $Du_n, D\theta_n$  зависят от масштаба Мони́на–Обухова  $L$ , то выражение (9) есть явно-неявная функция  $L$ .

Для нахождения  $L$  задаются некоторым значением  $L_{\max}$  и варьируют его, например,  $L_i = DLi, i = 1, 2, 3, \dots, N; DL = L_{\max}/N$  до тех пор, пока разность или относительная погрешность:

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

не будет минимальной (в пределе  $\varepsilon \rightarrow 0$ ). Найденное значение  $L^*$ , при котором  $\varepsilon$  минимальна, и определит искомое значение  $L: L^* = DLi^*$ . Определив масштаб Мони́на–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. Поскольку параметр  $L$  может быть как  $L > 0$  так и  $L < 0$  (при  $L = 0$  режим движения теряет турбулентный характер [7]), 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). Выбор  $u_n, \theta_n$  по заданному  $z_n$  осуществляется следующим образом: при известном  $z_n$  находят  $u$ , по которому, в соответствии с формулами (4), (6), находят значения соответствующие  $u_n$  или  $\theta_n$ . Аналогично находят значения этих функций для другого значения  $z_n$  (другого уровня), вычисляя затем разности  $\Delta u_n, \Delta \theta_n$ . 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 при распределении по четырем сезонам года и четырем шестичасовым суточным отрезкам времени, начиная с двух часов ночи.

Усредненные метеорологические данные с учетом указанного распределения и оценкой минимальных и максимальных значений, а также значения температуры воздуха на уровне подстилающей поверхности представлены в таблице 1. Расчёт метеопараметров проводился для каждого из указанных в таблице сезонов и заданное время суток: 2:00, 8:00, 14:00, 20:00 часов.

Таблица 1. – Усредненные метеорологические данные района АЭС в Иордании [8]

	Min--> Max-->	7,25 31,71	8,81 30,17	189,6 274,5	2,0 5,0	9,39 28,85	190,1 276,3	2,7 6,8	Среднее значение давления (кПа)	32,02 6,98
Сезон	Время	Температура на высоте 1,5 м (°С)	Температура на высоте 10 м (°С)	Направление ветра на высоте 10 м (град)	Скорость ветра на высоте 10 м (м/с)	Температура на высоте 58 м (°С)	Направление ветра на высоте 58 м (град)	Скорость ветра на высоте 58 м (м/с)		* Температура на высоте 0 м (°С)
Лето С 21.06 по 22.09	2:00	19,67	20,96	229,30	2,09	22,04	246,02	3,55	939	19,41
	8:00	23,17	22,16	218,49	2,45	21,64	239,76	3,36	940	23,38
	14:00	31,71	30,17	217,42	5,01	28,85	240,39	6,79	938	32,02
	20:00	24,73	24,83	242,77	3,73	24,75	267,67	6,25	939	24,71
Осень С 23.09 по 20.12	2:00	13,03	14,48	212,20	2,28	16,28	224,38	3,49	945	12,74
	8:00	14,55	14,57	209,78	2,20	15,58	211,00	3,13	945	14,55
	14:00	23,45	22,37	190,02	4,14	21,42	204,33	5,42	943	23,67
	20:00	16,88	17,64	221,46	2,32	18,58	234,72	3,99	944	16,73
Зима С 21.03 по 20.03	2:00	7,25	8,81	202,15	2,03	9,85	207,99	2,75	946	6,98
	8:00	9,21	9,10	195,53	2,36	9,39	197,56	3,26	947	9,23
	14:00	17,70	16,37	189,59	4,02	15,72	190,11	4,86	945	17,97
	20:00	9,95	11,23	221,15	2,28	12,21	219,48	3,09	946	9,69
Весна С 21.03 по 20.06	2:00	13,95	15,43	210,45	1,96	16,64	231,95	2,73	942	13,65
	8:00	18,40	17,39	190,02	2,54	17,02	198,15	3,34	942	18,61
	14:00	26,40	24,84	234,98	4,87	23,77	252,16	6,09	941	26,72
	20:00	19,52	19,48	274,51	3,03	19,39	276,31	4,79	942	19,53

\* Параметр рассчитан методом квадратичной экстраполяции:  $y = ax^2 + bx + c$ .

При определенной в ходе расчета минимальной относительной погрешности  $\epsilon(i)$  были получены значения индекса  $i^*$  для дальнейшего вычисления масштаба Монино–Обухова  $L$  в каждое время суток, указанное в таблице 1. На рисунках 1–3 эти зависимости приведены на 20.00 в зимний, весенний и осенний периоды. Анализ зависимостей, приведенных на указанных рисунках, показывает, что с ростом индекса  $i$  относительная погрешность  $\epsilon(i)$  стремится к минимуму в широкой области его изменения, уменьшаясь до нуля при некотором  $i^*$ , определяя, таким образом, искомый масштаб Монино–Обухова  $L_i^* = \Delta L_i^*$ , и затем снова возрастает. Подобный характер зависимости  $\epsilon(i)$  оказывается справедливым практически для всех сезонов. Однако в ряде случаев, в поведении функции  $\epsilon(i)$  может наблюдаться два минимума: первый – широкий в области  $i < N$  ( $\epsilon_i = 0$ ), второй узкий при  $i > N$ . Второй минимум для функции  $\epsilon(i)$  в области значений индекса  $i > N$  ( $\epsilon_i < 100\%$ , но  $\neq 0$ ) может быть обусловлен небольшой величиной разности  $(N+1-i)$  близкой к нулю, которая определяет состояние устойчивости атмосферы (см., например, рис. 3). В этом случае следует обратить внимание на характер спада и диапазон изменений индекса  $i$ , при котором происходит этот спад. Если диапазон изменений  $i$ , при которых наблюдается второй минимум, незначителен, то его не следует принимать во внимание. Анализ полученных в ходе расчета значений масштаба приземного слоя (параметра Монино–Обухова)  $L$  позволил сделать вывод, что характер состояния атмосферы в общем случае является устойчивым  $L > 0$ . Область неустойчивости ( $L < 0$ ) характерна для летнего и весеннего сезонов в вечернее время  $\sim 20.00$ . Найденные значения  $L$  и  $v_*$  по формуле (11), дали возможность рассчитать по формулам (1) значения скорости воздушного потока  $u(z)$ , коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$  и энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$  для различных сезонов, усреднённые значения которых приведены в таблице 2. На рис. 4, 5 приведены зависимость скорости приземного слоя атмосферы как функция высоты для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы. На рисунках 6, 7 и рисунках 8, 9 приведены зависимость коэффициента турбулентной диффузии и энергии турбулентных пульсаций, как функции высоты, соответственно для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы.

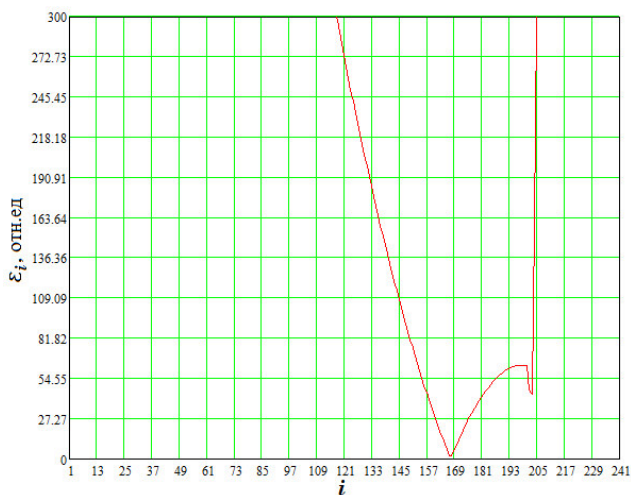


Рис. 1. – Относительная погрешность  $\epsilon_i$ . Зима, 20:00;  $L = 17$

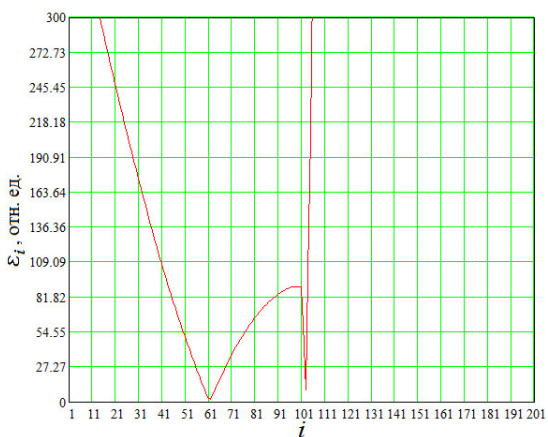


Рис. 2. – Относительная погрешность  $\epsilon_i$ . Осень, 20:00;  $L = 39$

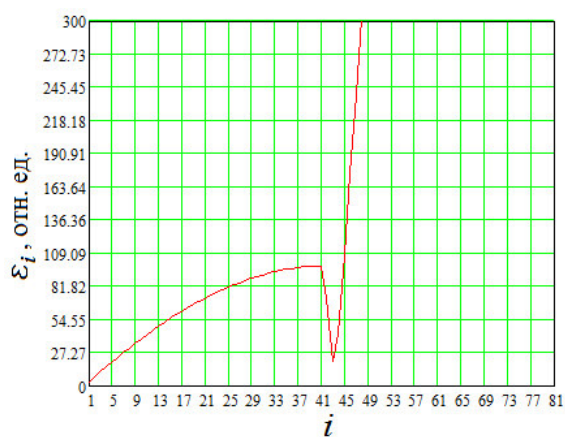


Рис. 3. – Относительная погрешность  $\epsilon_i$ . Весна, 20:00;  $L = -5$

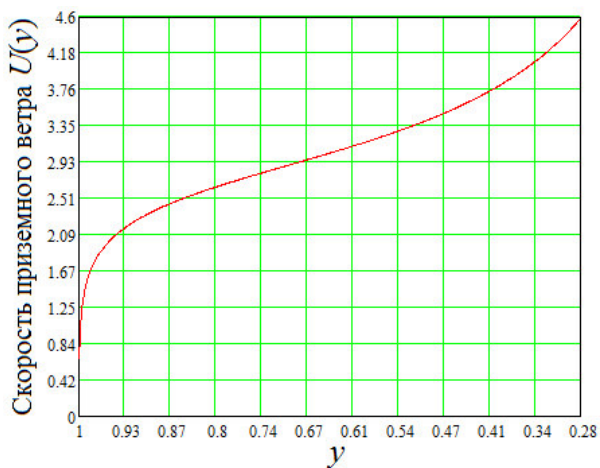


Рис. 4. – Зависимость скорости воздушного потока приземного слоя атмосферы  $u(z)$  зимой при устойчивом состоянии атмосферы  $L = 17$  м;  $v_* = 0,139$

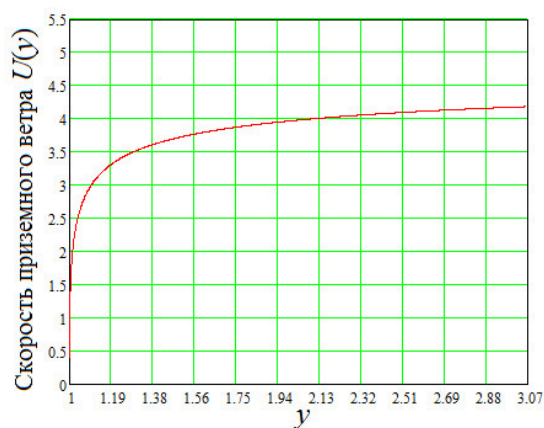
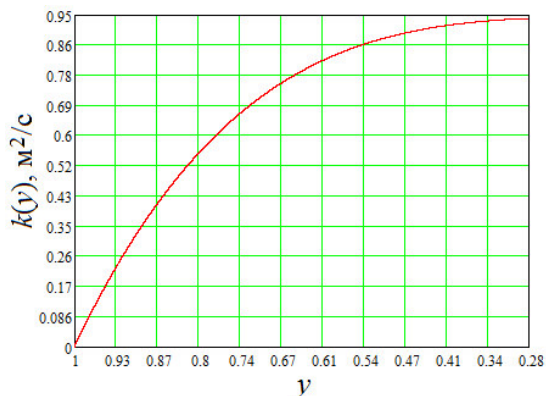
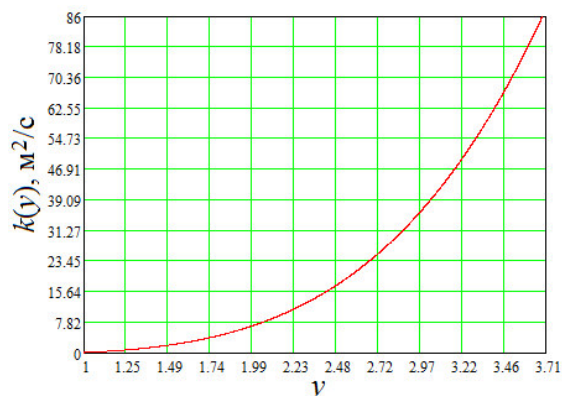


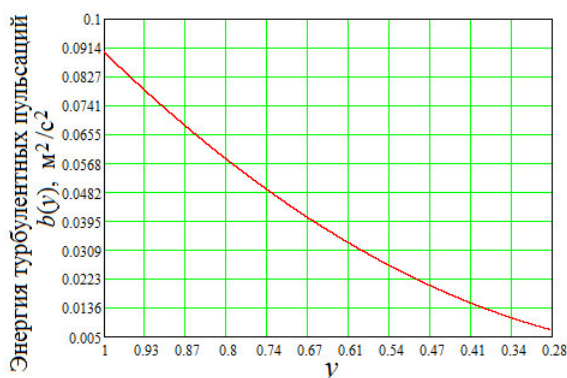
Рис. 5. – Зависимость скорости воздушного потока приземного слоя атмосферы  $u(z)$  весной при неустойчивом состоянии атмосферы  $L = -5$  м;  $v_* = 0,232$



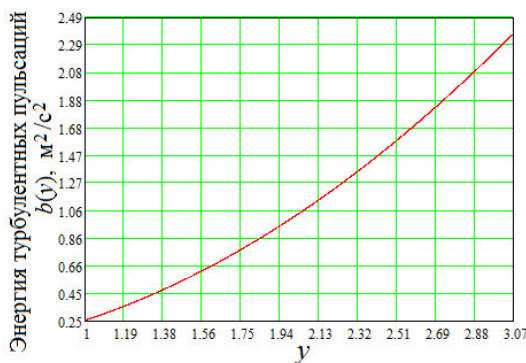
**Рис. 6.** – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии  $k(y)$  при устойчивом состоянии атмосферы (зима)  $L = 17$  м;  $v_* = 0,139$



**Рис. 7.** – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии  $k(y)$  при неустойчивом состоянии атмосферы (весна)  $L = -5$  м;  $v_* = 0,232$



**Рис. 8.** – Зависимость энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$  для устойчивого состояния атмосферы (зима)  $L = 17$  м;  $v_* = 0,139$



**Рис. 9.** – Зависимость энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$  для неустойчивого состояния атмосферы (весна)  $L = -5$  м;  $v_* = 0,232$

Анализ приведённых зависимостей показывает их существенное различие как по абсолютной величине, так и по характеру их изменения с высотой «у». Например, при устойчивом состоянии скорость ветра растёт с высотой<sup>1</sup> (см. рис. 4), а при неустойчивом (рис. 5) становится практически постоянной величиной. Коэффициент турбулентной диффузии при неустойчивом состоянии атмосферы (см. рис. 6, 7) отличается, практически, на два порядка от такового в отличие от устойчивого состояния атмосферы, изменяя при этом характер роста с высотой. Энергия турбулентных пульсаций изменяется не только по абсолютной величине при устойчивом и неустойчивом состояниях атмосферы, но и изменяет характер зависимости производной указанной величины, т.е. носит спадающий характер при устойчивом состоянии (см. рис. 8) и, напротив, демонстрирует рост при неустойчивом состоянии атмосферы (рис. 9).

Характер полученных зависимостей скорости ветра  $u(z)$  (рис. 4, 5) и коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$  (рис. 6, 7) как функций высоты  $z$  хорошо

<sup>1</sup> Максимальные значения  $u_{max}$  приведенные на оси абсцисс на каждом из графиков и вычисляемой по формуле (8), соответствуют наибольшей из рассматриваемых высот  $Z_{max} = 100$  м, а их различие обусловлено разным масштабом турбулентности  $L$  при определении указанной величины.

согласуется с известными в литературе данными для указанных зависимостей при соответствующем состоянии атмосферы [5–7, 9]. Последнее позволяет констатировать, что и расчёты зависимостей энергии турбулентных пульсаций, приведённых на рисунках 8, 9, также проведены корректно.

**Таблица 2.** – Усреднённые характеристики метеопараметров

Сезон времени года	$\bar{u}$ , м/с	$\bar{k}$ , м <sup>2</sup> /с	$\bar{b}$ , м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	L, м	$v_*$
Зима, 20:00	3,057	0,684	0,041	17	0,139
Весна, 20:00	3,836	11,743	1,129	-5	0,232

Перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии, полагая при этом, что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса, и, определяя, таким образом, объёмную активность примеси выражением [7]:

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

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;

$\sigma$  – постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной загрязняющей примеси, представляющая собой постоянную вымывания примеси из атмосферы  $\sigma_0$  (с<sup>-1</sup>), 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  $u(z)$ ,  $\alpha = 0,015$ .

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



$$\bar{u} = \frac{\int_0^{H_{np}} u(z) \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{np}} \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}.$$

Граничные условия определяются выражениями:

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

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

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

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

где  $\beta$  – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность;

$z_0$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

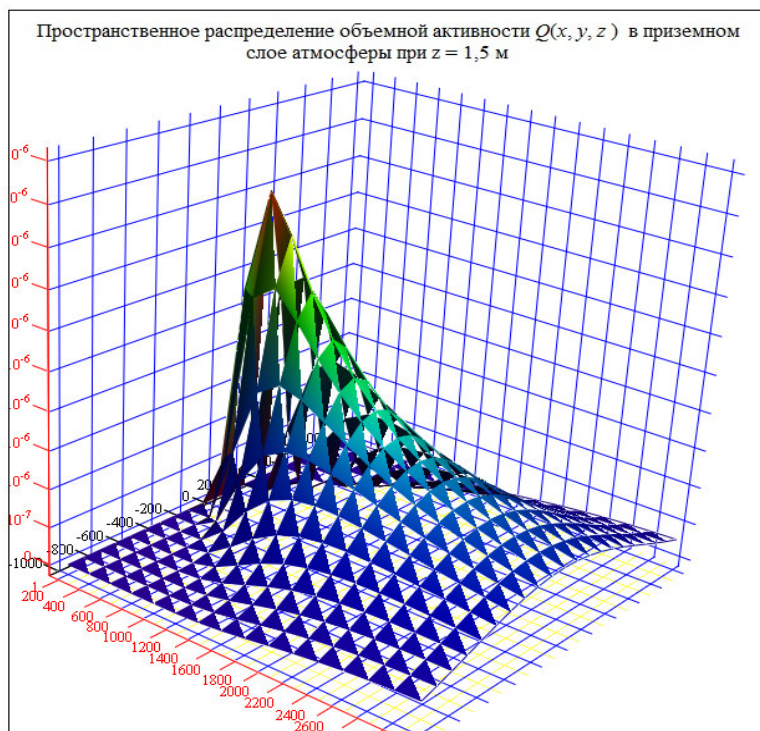
Аналитическое решение этой частной задачи (15) – (19) дается выражением (20), непосредственно объемная активность газоаэрозольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (13).

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

$$\left. \times \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{2\beta - w}{2k} \right) \sqrt{kx/\bar{u}} + \frac{(z + h_{\phi})}{2\sqrt{kx/\bar{u}}} \right] \right\}$$

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 рис. 10. 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 [10]. Поэтому в условиях радиационных аварий необходимо, по возможности, уточнить состояние устойчивости атмосферы, используя более надежные технологии измерения, а также использовать радиоуправляемые беспилотные средства дозиметрического контроля типа беспилотного дозиметрического комплекса (БДК) [5], позволяющие провести как дозиметрический, так и радиометрический контроль воздушного бассейна и подстилающей поверхности в режиме реального времени.



**Рис. 10.** – Распределение объемной активности газоаэрозольной радиоактивной примеси как функции  $x, y$  при  $z = 1,5$  м, характерное для неустойчивого состояния атмосферы

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 [11] или метод Монте-Карло [12-15] вблизи источника выбросов, или, при измеренных значениях объёмной активности, получить указанные оценки в рамках концепции лучевого равновесия [16] на территории, расположенной на расстояниях от источника от 700 до 10000 м [5,6].

На рисунках 11, 12 приведены результаты расчетов изолиний пространственного распределения радиоактивной примеси в приземном слое атмосферы (на высоте  $z = 1,5$  м), описываемого системой уравнений (13) – (20). Эти расчеты наглядно показывают, какую важную роль может играть состояние устойчивости атмосферы при оценке площади радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности и ущерба населенным пунктам, сельскохозяйственным угодьям и окружающей среде в целом. Характерной особенностью распределений, представленных на указанных рисунках, является очевидное гауссово уширение зависимости, представленной на рисунке 12 по сравнению с рисунком 11. Последнее обусловлено тем, что среднее значение коэффициента  $\bar{b}$ , определяющего поперечную диффузию факела выбросов при устойчивом состоянии (см. рис. 11), меньше в 27 раз, чем на аналогичном распределении, представленном на рисунке 12. На рисунке 13 в рамках рассматриваемой задачи, приведены результаты расчета осевого распределения радиоактивной примеси для полученных значений состояний устойчивости атмосферы. Из анализа характера распределения изолиний, приведенного на этом рисунке, следует, что максимум поверхностного загрязнения в зависимости от состояния устойчивости атмосферы располагается на различных расстояниях от источника выбросов, что непосредственно следует из рисунков 11, 12. Также, в ходе проведенного анализа были получены значения поперечного распределения выбросов объемной активности на различных расстояниях от источника радиоактивного выброса (рис. 14 а, б). Характер

распределений, представленных на рисунке 13, обусловлен существенным различием поведения скорости воздушного потока как функции высоты, а также высоким коэффициентом турбулентной диффузии при неустойчивом состоянии атмосферы.

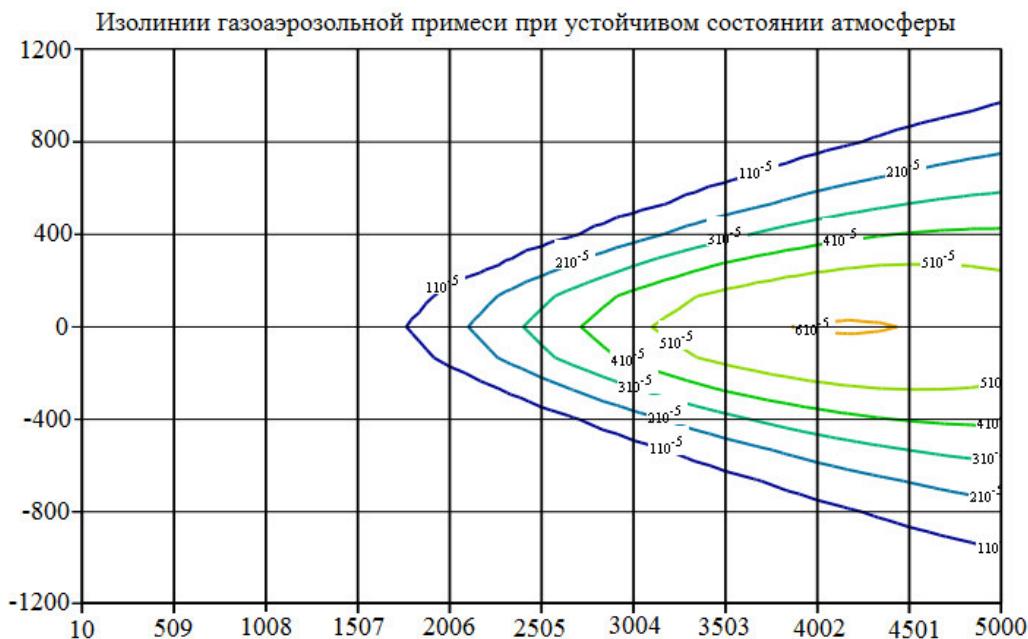


Рис. 11. – Уровни поверхностного загрязнения подстилающей поверхности для устойчивого состояния атмосферы при  $L = 17$ ,  $z = 1,5$  м,  $\bar{b} = 0,041$

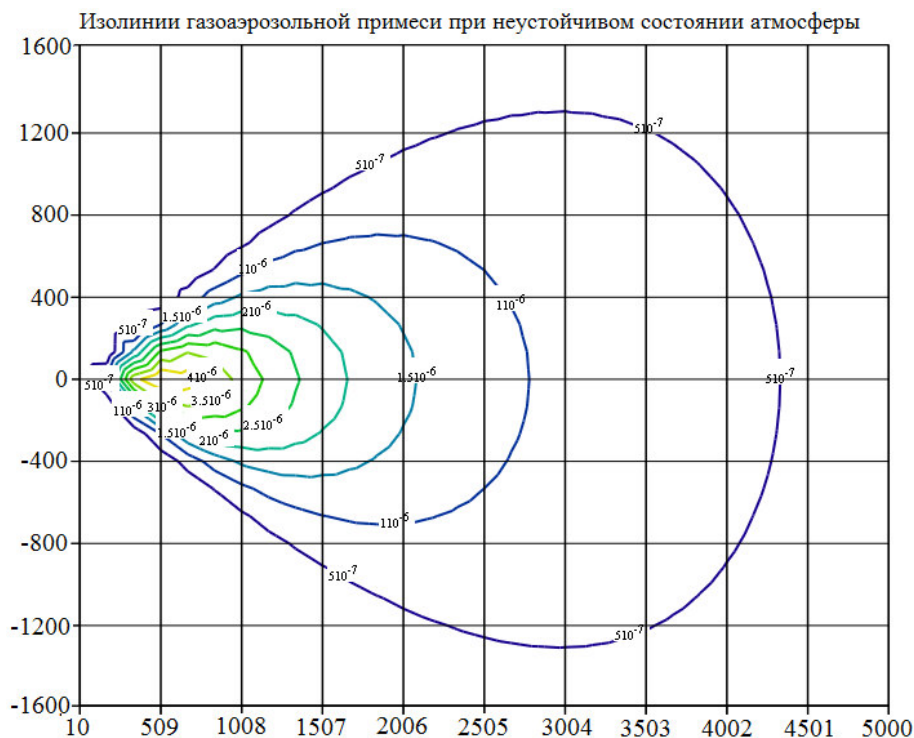
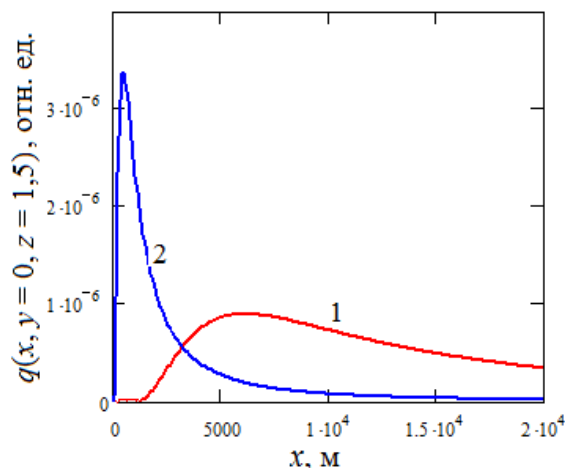
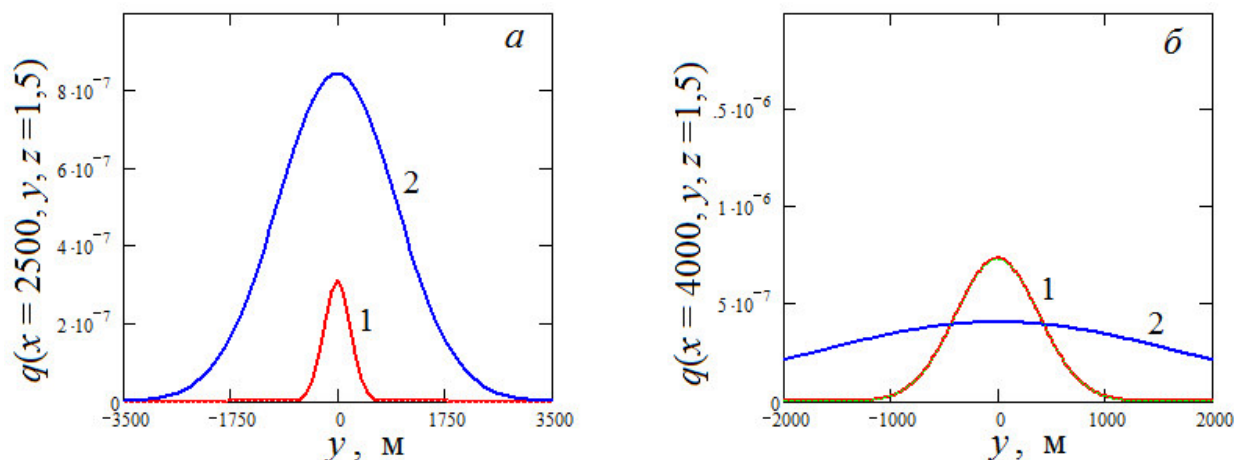


Рис. 12. – Уровни поверхностного загрязнения подстилающей поверхности для неустойчивого состояния атмосферы при  $L = -5$ ,  $z = 1,5$  м,  $\bar{b} = 1,129$



**Рис. 13.** – Осевые распределения выбросов объемной активности  $q(x, y = 0, z = 1,5)$  газоаэрозольной радиоактивной примеси при устойчивом состоянии атмосферы 1 ( $L = 17$ ) и при неустойчивом 2 ( $L = -5$ )

Характер поперечных распределений, представленных на рисунке 14 (а, б), не противоречит распределениям, приведённым на рисунках 11 и 12. Гауссово уширение струи, которое демонстрируется на рисунке 12, соответствует тому, что кривые 2 на рисунке 14 а и б шире, чем кривые 1, а на больших расстояниях ( $x = 3000$ , рис. 8 б) этот эффект более заметен. На небольших расстояниях от источника выбросов амплитуда кривой 2 заметно больше, чем кривой 1, что соответствует кривым осевого распределения, представленных на рисунке 13.



**Рис. 14.** – Поперечные распределения выбросов объемной активности:  $q(x = 2500, y, z = 1,5)$  (а) и  $q(x = 4000, y, z = 1,5)$  (б) газоаэрозольной радиоактивной примеси при устойчивом  $L = 17$  (1) и неустойчивом  $L = -5$  (2) состояниях атмосферы

Использование этого эффекта, т.е. зависимость уширения распределения от состояния устойчивости атмосферы, позволяет найти оптимальные значения необходимого  $N_n$  и достаточного  $N_d$  числа датчиков АСКРО для любого состояния устойчивости атмосферы, которым характеризуется тот или иной регион, в котором размещается АЭС [17, 18] и, в частности, район строительства АЭС в Иордании.

Метод оценки значений  $N_n$  и  $N_d$  иллюстрируется на рисунке 15, на котором в центре санитарно-защитной зоны (СЗЗ) радиусом  $R_0$  размещается условный источник выброса, ось которого направлена по оси  $Ox$ . В системе координат  $XOY$  строят кривую распределения мощности дозы подобную распределению, приведенному на рисунке

14a. На расстоянии  $\delta$  от оси факела выбросов по графику определяют значение мощности дозы, соответствующее предельной чувствительности детектора, при различном состоянии устойчивости атмосферы [4, 17, 18], полагая, что в максимуме кривой мощность дозы соответствует значению, характерному мощности дозы допустимой для населения, при котором, согласно [19], значение годовой дозы составляет 5 мЗв/год. Определив  $\delta$ , и, полагая, что датчики распределяются по периметру СЗЗ равномерно по азимуту, находят длину дуги  $l$ , равную, согласно рисунку,  $l = R_0 \arctg(\delta/R_0)$ , после чего находят значение  $N_n = \pi R_0/l$  и, окончательно:

$$[N_n] = \pi / \arctg(\delta/R_0), N_d = N_n + 1. \tag{21}$$

При малых значениях отношения  $\delta/R_0 \ll 1$ , которые характерны для устойчивого состояния атмосферы (см. рис. 14 а), вместо значения  $[N_n]$ , определяемого формулой (3), находят  $[N_n] = \pi R_0/\delta$ .

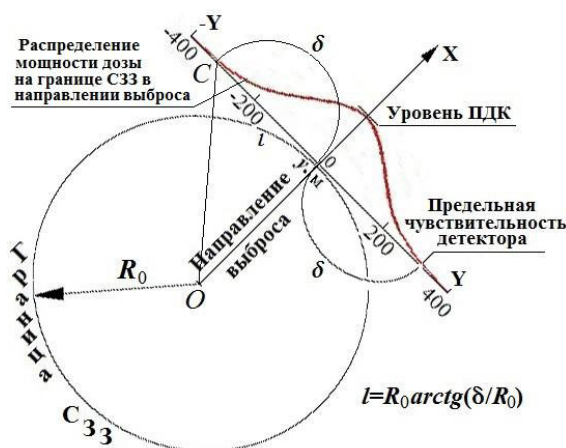


Рис. 15. – Иллюстрация выбора оптимального количества датчиков АСКРО. На оси ХОУ на границе СЗЗ в направлении выброса приведено поперечное распределение мощности дозы, создаваемой газоаэрозольной радиоактивной примесью.  $R_0$  – радиус СЗЗ

Таким образом, рассмотренная выше методика определения состояния устойчивости атмосферы позволяет определить необходимое и достаточное число постов радиационного контроля, размещаемых вокруг АЭС в Иордании, что представляет определённый интерес для проектировщиков и разработчиков АСКРО АЭС в этой стране. Следует отметить, что для России соответствующая оценка даёт 12 и 23 датчика соответственно для неустойчивого и устойчивого состояний атмосферы. Такое различие обусловлено именно существенно различным состоянием устойчивости атмосферы не только по величине, но и по знаку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елохин, А.П. и др. Анализ основных характеристик района размещения проектируемой АЭС в Иордании [Текст] / А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, П.И. Федоров, Е.А. Алалем // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №2(19). – С. 7–15.
2. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. – М.: МХО Интератомэнерго, 1992. 334 с.
3. 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.
4. 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.: сборник статей. – Мюнхен, 2016. С. 55–81.
5. *Елохин, А.П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды: монография [Текст] / А.П. Елохин. М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ядерный ун-т "МИФИ". – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
  6. *Елохин, А.П.* Оптимизация методов и средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин. Дисс. уч. ст. докт. техн. наук. – М.: МИФИ, 2001. – 325 с.
  7. *Лайхтман, Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
  8. Jordan Atomic Energy Commission. Meteorological data. Weather Station readings. 06.09.2014.
  9. *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.
  10. *Елохин, А.П. и др.* Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. 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. [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. [Б.м.], 2010. – 79 с.
  11. Метеорология и атомная энергия / Пер. с англ., под ред. Н.Л. Бызовой и К.П. Махонько. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 618 с.
  12. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений / Под ред. чл.-кор. АН СССР Г.И. Марчука. – М.: Атомиздат, 1967. – 256 с.
  13. Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. *Nukleonik*, 1964, Vol. 6, p. 14.
  14. *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.
  15. *Соболев, И.М.* Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
  16. *Гусев, Н.Г. и др.* Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
  17. *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.
  18. Alexander P. Elokhin and Ilia A. Starodubtcev. 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, Vol. 26, №2, pp. 23–43.
  19. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [Текст].

## REFERENCES

- [1] Elokhin A.P., Ksenofontov A.I., Fedorov P.I., Alalem E.A. Analiz osnovnykh kharakteristik rajjona razmeshhenija proektiruemojj AEhS v Iordanii [Main Characteristics Analysis of the NPP Placement Area Designed in Jordan]. *Globalnaja yadernaja bezopasnost [Global nuclear safety]*, 2016, №2(19), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 7–15. (in Russian)
- [2] Metody rascheta rasprostraneniya radioaktivnykh veshhestv v okruzhajushhejj srede i doz oblucheniya naselenija [Methods for Calculating the Spread of Radioactive Substances in the Environment and Doses to the Public]. М. Pub. МХО Интератомэнерго, 1992, 334 p. (in Russian)
- [3] Elokhin A.P., Starodubtcev I.A. Ocenka materialnykh zatrat pri likvidacii posledstviij radioaktivnogo zagraznenija podstilajushhejj poverkhnosti pri radiacionnoj avarii na OIAEh [The Material Costs in the Aftermath of Radioactive Pollution as a Result of Radiation Accident at Nuclear Facilities]. *Globalnaja yadernaja bezopasnost [Global nuclear safety]*, 2016, №3(20), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 7–34. (in Russian)



- [4] Elokhin A.P., Starodubcev I.A. Nekotorye ocenki materialnykh zatrat pri likvidacii posledstvij radioaktivnogo zagryaznenija okruzhajushhejj sredy v rezultate radiacionnoj avarii na OIAEh [Some Estimates of Material Costs during the Liquidation of the Consequences of Radioactive Contamination of the Environment as a Result of a Radiation Accident at the Nuclear Facilities]. Materials of the XIIth International Conference Science and Education. July, 1–2 2016. München, 2016. pp. 55–81. (in Russian)
- [5] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolja okruzhajushhejj sredy: monografija [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment: monograph]. M. Pub. NRNU MPhI, 2014, 520 p. (in Russian)
- [6] Elokhin A.P. Optimizacija metodov i sredstv avtomatizirovannykh sistem kontrolja radiacionnoj obstanovki okruzhajushhejj sredy. Dissertacija na soiskanie uchenojj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Optimization of Methods and Means of the Automated Control Systems of Environment Radiation Situation. The thesis for the Doctor of Engineering degree]. M. Pub. MPhI, 2001, 325 p. (in Russian)
- [7] Lajjkhtman D.L. Fizika pograničnogo sloja atmosfery [Physics of an Interface of the Atmosphere]. Leningrad. Pub. Gidrometeorologičeskoe izdatel'stvo, 1970, 340 p. (in Russian)
- [8] Jordan Atomic Energy Commission. Meteorological data. Weather Station readings. 06.09.2014. (in English)
- [9] Bobyleva M.M. Raschet kharakteristik turbulentsnosti v planetarnom pograničnom sloe atmosfery. Trudy Leningradskogo Gidrometeorologičeskogo instituta. Vol. 40 (Nekotorye voprosy fiziki pograničnogo sloja 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)
- [10] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyšenii točnosti prognostičeskikh ocenok radiacionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagryaznenija okruzhajushhejj sredy i dozovykh nagruzok na personal i naselenie. Ministerstvo prirodnykh resursov i ehkologii Rossijskojj Federacii, Federal'naja sluzhba po ehkologičeskomu, tekhnologičeskomu i atomnomu nadzoru RB – 053 – 09. Utverzhdeno prikazom Federal'noj sluzhby po ehkologičeskomu, tekhnologičeskomu i atomnomu nadzoru ot 08.06.2010 goda №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)
- [11] Meteorologija i atomnaja ehnergija. Perevod s anglijskogo. Pod redakciejj N.L. Byzovojj i K.P. Makhonko [Meteorology and Nuclear Energy. Trans. from English. Edited by N.L. Byzova and K.P. Mahonko]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat, 1971. 618 p. (in Russian)
- [12] Metod Monte-Karlo v probleme perenosa izluchenij. Pod redakciejj G.I. Marchuka [The Monte Carlo Method in the Problem of Radiation Transfer. Edited by G.I. Marchuk]. M. Pub. Atomizdat, 1967. 256 p. (in Russian)
- [13] Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems [Об использовании методов Монте-Карло для решения задач гамма-излучения]. Nukleonik, 1964, V.6, R.14. (in English)
- [14] Zolotukhin V.G., Kimel L.R., Ksenofontov A.I. etc. Pole izluchenija tochechnogo mononapravlennojj istočnika gamma-kvantov [The Radiation Field of a Point Monodirectional Source of Gamma Quanta]. M. Pub. Atomizdat, 1974. 160 p. (in Russian)
- [15] Sobolev I.M. Chislennye metody Monte-Karlo. [Numerical Monte Carlo Methods] M. Pub. Nauka, 1973, 311 p. (in Russian)
- [16] Gusev N.G., Beljaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere. Spravochnik [Radioactive Emissions in the Biosphere: a reference book]. M. Pub. Ehnergoatomizdat, 1986, 224 p. (in Russian)
- [17] Elokhin A.P., Starodubcev I.A. K voprosu ob ispol'zovanii avtomatizirovannykh sistem kontrolja ehkologičeskoi obstanovki na territorijakh, privilegijushhikh k predpriyatijam chernoi, cvetnoi metallurgičeskoi i atomnoj promyshlennosti [Use of Automated Systems for Environmental Monitoring in the Area Surrounding Ferrous, Nonferrous Metallurgical Enterprises and Nuclear Industry]. Globalnaja yadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4(17), ISSN 2305-414Kh, eISSN 2499-9733, pp. 15–34. (in Russian)
- [18] Alexander P. Elokhin and Ilia A. Starodubtcev. 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. Vol. 26, №2, pp. 23–43. (in English)
- [19] Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiacionnoj bezopasnosti» [Sanitary Rules and Regulations. SanPiN 2.6.1.2523-09 "Norms of Radiation Safety"] (NRB-99/2009). (in Russian)

### **Metrological Characteristics for the NPP site in Jordan**

**E.A. Alalem\*<sup>1</sup>, A.P. Elokhin\*<sup>2</sup>, A.I. Ksenofontov\*<sup>3</sup>, P.I. Fedorov\*\*<sup>4</sup>**

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

*<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7207-5939*

*WoS ResearcherID: G-9489-2017*

*e-mail: issaalem2@yahoo.com ;*

*<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-7682-8504*

*WoS ResearcherID: G-9573-2017*

*e-mail: elokhin@yandex.ru ;*

*<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-6864-9805*

*WoS ResearcherID: H-1833-2017*

*e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru*

*\*\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SECNRS),  
Malaya Krasnoselskaya st. 2/8, bld. 5. Moscow, Russia, 107140*

*<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-0529-690X*

*WoS ResearcherID: H-1625-2017*

*e-mail: fedorov@secnrs.ru*

**Abstract** – This paper presents meteorological characteristics for the site of the NPP in Jordan, which are a measurement of wind speed and temperature at different heights on meteorological tower, for different seasons at different times of the day.

The obtained characteristics allow calculations of meteorological parameters in the atmospheric surface layer - air velocity, temperature, coefficient of turbulent diffusion and energy of turbulent pulsations as functions of height, that allows to formulate and to estimate the atmospheric dispersion of Radioactive Materials in the environment in the framework of atmospheric boundary layer model in case of hypothetical accident at the nuclear power plant in Jordan, also to conduct studies to determine the necessary and sufficient amount of radiation detectors that has to be placed around the NPP.

The presented model can be used in the future to estimate the atmospheric dispersion of Radioactive Materials in the environment.

*Keywords:* radiation accident, meteorological characteristics, ionizing radiation, dispersion of Radioactive Materials in the environment, ionization detectors.