

Ю. В. Бончук, Г. Г. Ратиа, А. В. Кашпаров

Научно-исследовательский институт радиационной защиты АТН Украины

Выбросы при нормальной эксплуатации АЭС и облучение населения

Рассмотрены принципы расчета доз населения при нормальной эксплуатации АЭС. Полученные результаты расчетов проанализированы с точки зрения установления радиационно-гигиенических регламентов первой группы (контрольные и допустимые уровни выброса), для которых даны рекомендации.

Ю. В. Бончук, Г. Г. Ратиа, О. В. Кашпаров

Викиди при нормальній експлуатації АЕС і опромінення населення

Розглянуто принципи розрахунку доз населення при нормальній експлуатації АЕС. Отримані результати розрахунків проаналізовані з точки зору встановлення радіаційно-гігієнічних регламентів першої групи (контрольні і допустимі рівні викиду), для яких наведено рекомендації.

Актуальная для современной ядерной энергетики проблема анализа дозиметрической обстановки, формируемой газо-аэрозольным выбросом АЭС, тесно связана с вопросами нормирования выброса (контрольные и допустимые уровни) не только при аварийных ситуациях и радиационных авариях, но и в условиях нормальной эксплуатации. Сложности анализа и обработки большого объема динамически изменяющихся входных данных и наличие выпадений на поверхность почвы, формирующихся в течение длительного времени эксплуатации АЭС, обуславливают сложности прогнозирования результата и приводят к непропорциональности изменения эффективных доз населения изменению выброса.

В статье приводятся результаты анализа дозиметрической обстановки для населения, проживающего в зоне наблюдения Ровенской АЭС (РАЭС).

Методы расчета доз облучения

Исходные данные. Для расчёта доз облучения используются исходные данные, подразделяющиеся на две группы. К первой относятся «динамические» данные, варьирующиеся во времени: метеорологические данные, получаемые с метеостанции эксплуатируемой РАЭС, а также величины газо-аэрозольного выброса каждого из контролируемых радионуклидов, определяемые непосредственно на источнике выброса. Вторая группа включает в себя параметры, специфические для РАЭС, но являющиеся, в определенной степени, «статическими» ввиду своей неизменности во времени. К ним относятся высоты источников выброса, расстояния от источников выброса до границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и др.

Методы расчета доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения РАЭС, ориентированы в первую очередь на возможности формирования «динамических» данных о метеорологических условиях и величине газо-аэрозольного выброса. Цех радиационной безопасности (ЦРБ) РАЭС имеет возможность предоставлять сводные посуточные метеорологические данные о повторяемости:

категорий устойчивости атмосферы от А до G (по Пасквиллу);

направления ветра по 16 секторам (каждый по 22,5°);

скорости ветра по 10 диапазонам скоростей (от 0 до 60 м·с⁻¹).

Указанные данные представляются в табличной форме. На рис. 1 приведен пример фактических суточных данных (отображены только ненулевые значения в процентах) о повторяемости метеоусловий по направлениям ветра (по столбцам), а также по категориям устойчивости и градации по скоростям ветра (по строкам). Представленная таблица имеет ярко выраженную разреженность, при этом более 90 % времени в течение суток направление ветра находилось в пределах двух секторов (что составляет 45°). Скорость ветра варьировалась в диапазоне от 1 до 6 м·с⁻¹ (более 75 % — от 3 до 6 м·с⁻¹), при этом на рисунке оставлены только 7 из 10 диапазонов скоростей ветра — от 0,4 до 8 м·с⁻¹. Подобная структура и наполненность характерны для таблиц, содержащих рассматриваемые метеоданные.

Кроме рассмотренных выше метеоданных, ЦРБ РАЭС представляет сводные посуточные данные о повторяемости осадков с приведением вымывающей способности осадков каждого типа к абсолютной вымывающей способности дождя интенсивностью 1 мм·ч⁻¹ (в таблицах, структура которых аналогична приведенной на рис. 1).

	м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
A	0.4 - 1								
	1 - 2								
	2 - 3								
	3 - 4								
	4 - 6								
	6 - 8								
B	0.4 - 1								
	1 - 2				0.556	0.069			
	2 - 3				1.458	0.625			
	3 - 4				0.208	0.139			
	4 - 6								
	6 - 8								
C	0.4 - 1								
	1 - 2				0.278	0.069			
	2 - 3				2.847	2.986			
	3 - 4			0.139	3.472	2.083			
	4 - 6				0.278	0.069			
	6 - 8								
D	0.4 - 1								
	1 - 2					0.139			
	2 - 3				0.694	1.736	0.208		
	3 - 4				3.542	3.403			
	4 - 6				1.042	0.417			
	6 - 8								
E	0.4 - 1								
	1 - 2					0.069			
	2 - 3				0.069	4.375	1.389		
	3 - 4				0.694	8.750	3.542		
	4 - 6			0.208	5.069	0.278	0.208		
	6 - 8								
F	0.4 - 1								
	1 - 2								
	2 - 3				0.208	0.556			
	3 - 4				0.903	1.319	0.417		
	4 - 6				0.764				
	6 - 8								
G	0.4 - 1								
	1 - 2								
	2 - 3			0.069	4.375	1.250	0.556		
	3 - 4			1.458	12.778	4.722	0.903		
	4 - 6			0.694	16.736	1.111	0.069		
	6 - 8								

Рис. 1. Пример таблицы с данными о фактической суточной повторяемости, %, метеоусловий по категориям устойчивости, направлениям ветра и градации по скоростям ветра

Данные о величине газо-аerosольного выброса РАЭС представляются в двух формах:

выброс ^{131}I и инертных радиоактивных газов (ИРГ) за сутки;

выброс ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{134}Cs , ^{137}Cs за месяц.

Поскольку метеорологические данные и данные о выбросе радионуклидов структурно различны, для выполнения расчетов приняты допущения, позволяющие их совместное использование и заключающиеся в равномерности выброса ^{131}I и ИРГ в течение суток и других радионуклидов в течение месяца.

Для моделирования выброса ИРГ используется следующий их состав: 10 % ^{88}Kr , 72 % ^{133}Xe , 18 % ^{135}Xe . Такой состав соответствует составу ИРГ, установленному документом «Порядок установления допустимых уровней сбросов и выбросов АЭС Украины (радиационно-гигиенические регламенты I группы). Методические указания» и обеспечивает выполнение консервативно-реалистичных дозовых оценок.

Расчеты доз облучения. Структура метеорологических данных формирует следующий подход к расчетам доз населения: зона наблюдения РАЭС разбивается на 16 секторов (соответствующих 16 направлениям ветра в метеоданных, рис. 2), каждый из которых, в свою очередь, подразделяется на подсектора (по расстоянию от источника выброса). Разбиение по расстоянию от источника выброса производится от 2,5 км (радиус СЗЗ РАЭС) до 10 км по каждому из секторов (до 20 «элементов» расчёта в секторе, с учетом наличия населенных пунктов), т. е. выделяется диапазон расстояний, где возможно достижение максимальных значений эффективных доз населения.

Таким образом, каждому подсектору ставятся в соответствие координаты (φ, x) , где φ — угол, соответствующий сектору, x — расстояние от источника выброса [в дальнейшем такой подсектор сокращенно называется «подсектор (φ, x) », а весь сектор — «сектор φ »].

Расчеты доз по каждому из построенных подсекторов выполняются для населения референтных возрастов (τ) ,

среднесуточные (за календарную дату Θ) объемная (в приземном слое воздуха) и поверхностная (на почве) удельные активности радионуклида в подсекторе (φ, x) ; $g_{\tau,i}^{cl}$ и $g_{\tau,i}^{strf}$ — эффективные дозы внешнего облучения на единицу объемной удельной активности радионуклида в воздухе и слое почвы толщиной 5 см, соответственно [1]; L — толщина верхнего слоя почвы (принимается равной 5 см).

При расчете доз внешнего облучения используется коэффициент режима поведения, отражающий особенности облучения населения и соответствующим способом уменьшающий дозы облучения. С учетом данных [2] применяются следующие значения этого коэффициента: 0,29 — села, 0,2 — поселки городского типа и малые города с преобладанием одноэтажных жилых домов, 0,13 — города.

Ожидаемые эффективные дозы внутреннего облучения населения в подсекторе (φ, x) за счет ингаляционного и перорального поступления радионуклида в течение календарного года определяются таким образом:

$$E_{\tau,i}^{inhal}(\varphi, x) = g_{\tau,i}^{inhal} \sum_{\Theta} A_{V,i}(\varphi, x, \Theta);$$

$$E_{\tau,i}^{ingest}(\varphi, x) = e_{\tau,i}^{ingest} \sum_{\Theta} I_{\tau,i}^{ingest}(\varphi, x, \Theta), \quad (3)$$

где $g_{\tau,i}^{inhal}$ — эффективная доза внутреннего облучения (за счет ингаляционного поступления) на единицу объемной удельной активности радионуклида в воздухе; $e_{\tau,i}^{ingest}$ — эффективная доза внутреннего облучения на единицу перорального поступления радионуклида; $I_{\tau,i}^{ingest}(\varphi, x, \Theta)$ — суточное пероральное поступление радионуклида.

Значения $g_{\tau,i}^{inhal}$ и $e_{\tau,i}^{ingest}$ рассчитываются согласно биокинетическим и дозиметрическим моделям Международной комиссии по радиологической защите, в частности [3], [4].

Как следует из приведенных формул, базовыми величинами для выполнения дозовых расчетов являются среднесуточные значения объемной (в воздухе) и поверхностной (на почве) удельных активностей радионуклидов. Для их расчетов применяется модель Гаусса [5], [6] распространения примеси с облаком выброса. Среднесуточная объемная удельная активность радионуклида в приземном слое воздуха в подсекторе (φ, x) за календарную дату Θ рассчитывается по формуле

$$A_{V,i}(\varphi, x, \Theta) = Q_i(\Theta) \frac{N}{\sqrt{2\pi^3 x}} \times \sum_{\chi} \left[\frac{1}{\sigma_{z,\chi}(x)} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_{z,\chi}^2(x)}\right) \sum_w \frac{P_{\varphi,\chi,w}^{\Theta} F_{i,\chi,w}(\varphi, x, \Theta)}{u_{\varphi,\chi,w}^{\Theta}} \right], \quad (4)$$

где $Q_i(\Theta)$ — выброс радионуклида; N — количество секторов (16); χ — категория устойчивости атмосферы; w — диапазон скорости ветра для χ -й категории устойчивости; $P_{\varphi,\chi,w}^{\Theta}$ — среднесуточная повторяемость χ -й категории устойчивости атмосферы для w -й скорости ветра в секторе φ ; $\sigma_{z,\chi}(x)$ — стандартное отклонение распределения примеси в облаке выброса в вертикальном направлении для χ -й категории устойчивости атмосферы; $u_{\varphi,\chi,w}^{\Theta}$ — w -я скорость ветра в секторе φ для χ -й категории устойчивости; h — эффективная высота выброса; $F_{i,\chi,w}(\varphi, x, \Theta)$ — функция

истощения радионуклида в облаке выброса для χ -й категории устойчивости атмосферы при w -й скорости ветра в подсекторе (φ, x) (является произведением функций истощения за счет сухого осаждения, влажного осаждения и радиоактивного распада).

Расчеты $\sigma_{z,\chi}(x)$ и $F_{i,\chi,w}(\varphi, x, \Theta)$ выполняются согласно [5], [6], [7].

Значения среднесуточных (за календарную дату Θ) поверхностных удельных активностей радионуклидов на почве в подсекторе (φ, x) путем интегрирования за все время работы РАЭС

$$A_{S,i}(\varphi, x, \Theta) = \int_{\Theta_0}^{\Theta} \dot{A}_{S,i}(\varphi, x, t) \exp(-\Lambda_{sum,i}(\Theta - t)) dt, \quad (5)$$

где Θ_0 — начало аккумуляции выпадений (начало работы РАЭС); $\dot{A}_{S,i}$ — плотность потока осаждения радионуклида на почву; $\Lambda_{sum,i}$ — постоянная снижения активности радионуклида, являющаяся суммой постоянной радиоактивного распада, скорости падения активности в результате перемещения за пределы верхнего (прикорневого) слоя почвы и скорости фиксации радионуклида в почве [8].

Среднесуточные плотности потока осаждения радионуклидов на поверхность почвы определяются суммированием среднесуточных плотностей потока осаждения радионуклидов на поверхность почвы в подсекторе (φ, x) вследствие сухого осаждения и вымывания осадками, определяемых согласно [7].

Для учета процессов вторичного ветрового подъема среднесуточная объемная удельная активность радионуклида в воздухе дополнительно корректируется:

$$\tilde{A}_{V,i}(\varphi, x, \Theta) = A_{V,i}(\varphi, x, \Theta) \left[1 + \int_{\Theta_0}^{\Theta} \dot{A}_{S,i}(\varphi, x, t) K_{\alpha,i}(\Theta - t) dt \right], \quad (6)$$

где $A_{V,i}(\varphi, x, \Theta)$ — среднесуточная объемная удельная активность радионуклида в воздухе без учета вторичного ветрового подъема; $K_{\alpha,i}$ — функция дефляции, рассчитываемая по формуле [7]

$$K_{\alpha,i}(t) = 10^{-5} \exp\left[-\left(1,47 \cdot 10^{-7} + \lambda_{r,i}\right) t\right] + 10^{-9} \exp\left[-\left(2,2 \cdot 10^{-10} + \lambda_{r,i}\right) t\right]. \quad (7)$$

Важной составляющей дозиметрических расчетов является определение величин перорального поступления радионуклидов. Для этой цели используется модель ECOSYS [8], модифицированная с учетом уровней потребления продуктов питания, характерных для населения Украины. Поскольку величины перорального поступления радионуклидов с загрязненными продуктами питания существенно зависят от сезонности выпадений, то по этой модели выполнены расчеты посуточных поступлений, формируемых выпадениями в каждый отдельный день года. Такие предварительно подготовленные наборы рассчитаны для всех рассматриваемых референтных возрастов.

Поскольку подробные исходные данные (в форме, изложенной в настоящем разделе) могут быть предоставлены

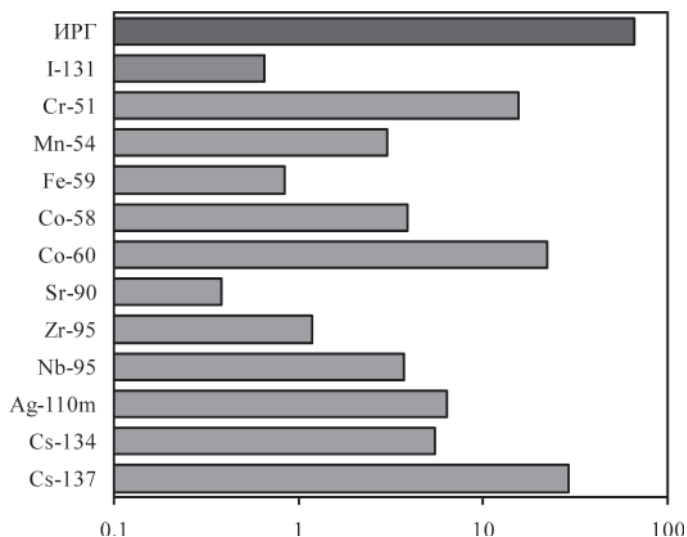


Рис. 3. Газо-аэрозольный выброс РАЭС в 2007 г. (активность ИРГ приведена в Гбк, I^{131} — в Гбк, остальных радионуклидов — в МБк)

только с 2006 г., то для учета последствий выброса РАЭС за предыдущие годы (сформировавших загрязнение почвы и последующее поступление с продуктами питания) используются усредненные метеоданные и данные о выбросе.

Результаты расчетов и их обсуждение. Расчеты доз облучения выполнены по данным о метеорологических условиях и величинам газо-аэрозольного выброса РАЭС в 2006–2007 гг. Как упоминалось выше, для расчетов по обоим годам использованы усредненные данные об их «предыстории» (до 2005 г. включительно), однако «предыстория» для 2007 г. включает в себя и подробные данные за 2006 г., поэтому результаты расчетов доз за 2007 г. более надежны. Таким образом, для более детального рассмотрения представлены расчеты доз за 2007 г.

Величины газо-аэрозольного выброса РАЭС отдельных радионуклидов за 2007 г. приведены на рис. 3.

По результатам расчетов наибольшие годовые дозы облучения получают дети (референтный возраст 1 год). Основной вклад в суммарную дозу облучения (рис. 4) формируют I^{131} и, частично, ИРГ; вклад остальных радионуклидов незначителен. При этом I^{131} практически полностью формирует дозу за счет перорального пути поступления (прежде всего, за счет поступления с молоком и листовыми овощами). Практически такая же ситуация имеет место с ИРГ и дозой внешнего облучения от облака выброса.

Поскольку большая часть дозы формируется I^{131} , то на рис. 5 представлены более подробные данные о динамике выброса I^{131} в 2006–2007 гг.

На рисунке хорошо видна неравномерность выброса йода: отношение максимального выброса за месяц к минимальному достигает 77 (такая вариабельность выбросов объясняется количеством блоков РАЭС, находящихся в разных режимах эксплуатации). Подобная ситуация наблюдается и для других радионуклидов, например для ^{58}Co эта величина равна 91, для ^{95}Nb — 61, для $^{110\text{m}}\text{Ag}$ — 47. Однако в отличие от I^{131} вклад этих радионуклидов в суммарную дозу очень мал. Что касается радионуклидов, которые могут заслуживать большего внимания (с точки зрения вклада в суммарную дозу), то для ^{137}Cs такое отношение равно 17, а для ^{60}Co — 22. Вариация выброса ИРГ существенно меньше и не превышает 3.

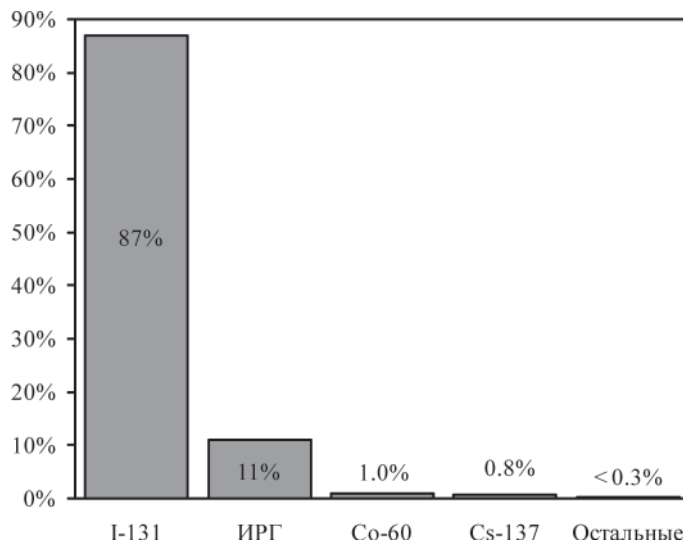


Рис. 4. Вклад радионуклидов в суммарную эффективную дозу за 2007 г. для населения, проживающего в зоне наблюдения РАЭС

Возвращаясь к I^{131} , следует обратить внимание на то, что суточная вариабельность его выброса существенно больше, чем для интервалов месячной продолжительностью. Особенно отчётливо это наблюдается на примере 2006 г., когда выброс I^{131} за четверо последовательных суток в июне составил 39 % годового выброса (а за 20 суток — 96 %). Ввиду малого периода полураспада I^{131} , он наиболее «радиологически» опасен в случае выброса летом, чем и объясняется столь значительный вклад этого радионуклида в суммарную дозу облучения. В 2007 г. картина не столь яркая, как в 2006 г., но, тем не менее, достаточно сильная неравномерность прослеживается и здесь, когда суммарный выброс за три летних месяца составил 81 % годового выброса.

Полученные результаты (особенно по йоду) важны также с точки зрения процедур радиационно-гигиенического регламентирования, а именно для целей установления и контроля значений контрольных и допустимых уровней выброса. Так как контрольные уровни устанавливаются исходя из достигнутого на объекте уровня радиационного благополучия, они должны отражать это благополучие в зависимости от режима эксплуатации объекта (и, естественно, будут существенно отличаться для разных режимов). Поскольку имеются примеры существенной вариабельности выброса радионуклидов

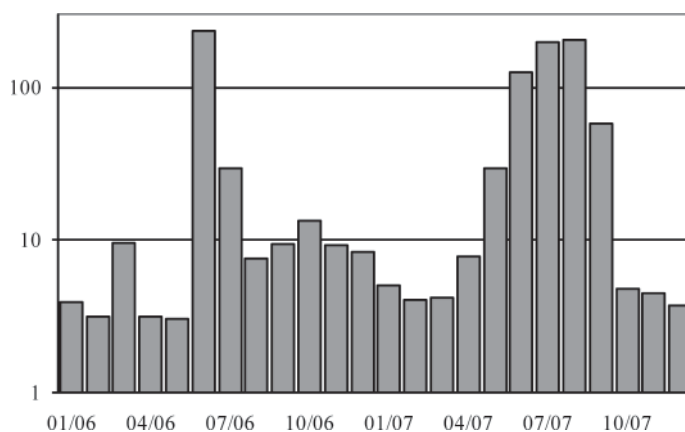


Рис. 5. Выброс I^{131} по месяцам 2006–2007 гг. («10/06» означает октябрь 2006 г.)

(например, почти 40 % годового выброса за четверо последовательных суток), то установление контрольных уровней (КУ) безотносительно к режиму эксплуатации блока АЭС (работа на мощности, планово-профилактический ремонт) приводит к определенной потере «функциональности» самих КУ и их неадекватности текущей ситуации. Другими словами, по отношению к одному режиму эксплуатации значения КУ могут быть значительно завышенными (а значит, не отвечающими «благополучию» такого состояния объекта), а по отношению к другому, наоборот, несколько заниженными (что может приводить к «ложной тревоге» при их превышении, которое еще не свидетельствует о радиационном «неблагополучии»). Естественным выходом из такой ситуации является установление КУ выбросов для каждого из блоков АЭС в зависимости от режима его эксплуатации.

Что касается допустимых уровней выброса, то значения пределов выброса радионуклидов рассчитываются исходя из «равномерности» метеорологических условий и величин выброса на протяжении всего календарного года. При значительном выбросе радионуклидов за несколько последовательных суток воздушный перенос радионуклидов происходит в направлении одних и тех же секторов, а не равномерно распространяется по всем. Таким образом, учет фактического сочетания метеорологических условий и величин выброса приводит к существенным отличиям от среднестатистических результатов. Например, при использовании усредненных исходных данных годовые дозы за счет перорального поступления были бы почти в 3 раза меньше, чем при использовании фактических данных РАЭС. Такие результаты диктуют необходимость при установлении пределов выброса учитывать возможные вариации метеорологических условий и величин выброса, например путем введения соответствующим образом обоснованных коэффициентов варибельности.

Выводы

1. По результатам расчетов годовых доз облучения (формируемых выбросом РАЭС при нормальной эксплуатации) населения, проживающего в зоне наблюдения РАЭС, основной вклад в суммарную дозу облучения (87 %) формирует ^{131}I (за счет перорального поступления с молоком и листовыми овощами). Вклад инертных радиоактивных газов (за счет внешнего облучения от облака выброса) достигает 11 %. Суммарный вклад ^{60}Co и ^{137}Cs составляет около 2 %.

2. Выбросы радионуклидов (особенно ^{131}I) имеют существенную варибельность на протяжении года, что объяс-

няется различным количеством блоков АЭС, находящихся в разных режимах эксплуатации. При этом выброс ^{131}I за четверо последовательных суток может достигать почти 40 % общего годового выброса, а за 20 суток — 96 %. Дозы облучения, рассчитанные с учетом фактических метеорологических данных и динамики выброса, почти в 3 раза превышают дозы облучения, полученные по усредненным за год исходным данным.

3. Существенная варибельность выброса радионуклидов, приводящая к более высоким дозам облучения, говорит о необходимости более тщательной регламентации в сфере установления значений контрольных и допустимых уровней выброса. Контрольные уровни выбросов могут устанавливаться для каждого из блоков АЭС в зависимости от режима его эксплуатации. При установлении пределов выброса целесообразно учитывать наблюдаемую варибельность метеорологических условий и величин выброса.

Литература

1. Eckerman K. F., Leggett R. W., 1996. DCFPAK: Dose coefficient data file package for Sandia National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM13347, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
2. Likhtariov I., Kovgan L., Novak D., Vavilov S., Jacob P. and Paretzke H. G., 1996. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Phys.* 70(1), 87–98.
3. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. — Oxford: Pergamon Press, 1994. — 482 p. (Публикация 66 МКРЗ, Модель респираторного тракта человека для радиологической защиты).
4. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: — Part 2. Ingestion Dose Coefficients. — Oxford: Pergamon Press, 1993. — 166 p. (Публикация 67 МКРЗ, Возраст-зависимые дозы лиц из населения от поступления радионуклидов. — Ч. 2: Дозовые коэффициенты при пероральном поступлении).
5. IAEA, 1980. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. A Safety Guide. IAEA Safety series No. 50-SG-S3.
6. IAEA, 1982. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases. Exposures of critical groups. IAEA Safety series № 57.
7. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 224 с.
8. Muller H., Prohl G., 1993. ECOSYS-87: A dynamic model for the assessment of the radiological consequences of nuclear accidents. *Health Phys.* 64, 232–252.

Надійшла до редакції 16.01.2009.