

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

В. Г. Батий, Д. В. Федорченко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Предложена математическая модель излучения радиоактивно загрязненного грунта. Рассмотрена методика расчета радиационной обстановки, учитывающая вклад излучения объекта «Укрытие» и загрязненных участков грунта. Приведены результаты расчетов распределения мощности дозы для монтажной зоны нового безопасного конфайнмента и зависимость средней мощности дозы участка от высоты.

Введение

В настоящее время начинается активная деятельность по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. Ведутся проектные работы по стабилизации строительных конструкций существующего объекта, также выполняется концептуальное проектирование нового безопасного конфайнмента (НБК), проектирование и строительство ряда новых сооружений ЗПЖРО, ПКОТРО и др.

При подготовке строительных площадок производится их обустройство, одной из целей которого является улучшение радиационной обстановки для снижения доз персонала. При этом производится удаление обнаруженных или известных источников излучения, сооружение защитных экранов и пр. Так, в ходе осуществления предварительных работ перед началом строительства НБК в локальной зоне и зоне надвижки планируется ряд мероприятий, включающих расчистку территории, удаление загрязненного поверхностного слоя грунта и обратную засыпку чистого грунта.

В результате осуществления этих мероприятий радиационная обстановка в местах производства работ должна заметно измениться. При этом представляет интерес не только радиационная обстановка вблизи поверхности земли, но и распределение мощности дозы по высоте. Это связано, например, с предполагаемыми работами по укрупнительной сборке при стабилизации, монтажу крупногабаритных конструкций НБК.

Для прогнозирования изменения радиационной обстановки необходима методика расчета пространственного распределения излучения для достаточно больших участков местности по имеющимся данным. В частности, такая методика должна корректно учитывать два основных фактора, определяющих радиационную обстановку: излучение объекта «Укрытие» и излучение загрязненных участков. При этом необходимо принимать во внимание, что радиоактивное загрязнение является неравномерным, что не позволяет применять для расчетов такие известные программы как, например, Microshield.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и вычислительной программы на ее основе, позволяющей определять радиационную обстановку на основании имеющихся данных по объемному загрязнению грунтов.

Излучение объекта «Укрытие»

Для получения адекватной картины распределения излучения необходимо отделить вклад излучения, создаваемого объектом «Укрытие», от излучения загрязненных участков.

Излучение объекта «Укрытие» определяется находящимися в нем скоплениями топливосодержащих материалов (ТСМ). При этом на небольших расстояниях (сравнимых с

© В. Г. Батий, Д. В. Федорченко, 2004

размерами излучающих поверхностей) построение математической модели затруднительно в силу сложной геометрии источников и наличия различных экранирующих объектов между точкой наблюдения и объектом. Вместе с тем на больших расстояниях от объекта «Укрытие» источники излучения можно считать точечными. Можно ожидать, что пространственное распределение излучения в этом случае будет удовлетворительно описываться обратной квадратичной зависимостью от расстояния до точки наблюдения.

Был проведен анализ имеющихся данных по радиационной обстановке. В основу оценок легли данные о мощности экспозиционной дозы (МЭД) на границе и за пределами локальной зоны на участках с низким уровнем поверхностных загрязнений и заметной толщиной послеаварийного техногенного слоя, а также данные по угловым распределениям.

Результаты анализа указывают, что на больших расстояниях (более 100 м) от объекта «Укрытие» вклад излучения находящихся в нем скоплений ТСМ можно оценить по эмпирической формуле

$$H = H_0 / r^2, \quad (1)$$

где $H_0 = 120 (P/ч) \cdot м^2$, r - расстояние от объекта, м.

Оценки вклада объекта «Укрытие» для монтажной зоны НБК дают значения от 10 до 95 % в зависимости от конкретного участка. При расчетах предполагалось, что мощность излучения объекта «Укрытие» практически не меняется с высотой (это утверждение справедливо на достаточно больших расстояниях от объекта). По мере получения новых экспериментальных данных, в частности по предпроектным исследованиям по НБК, которые проводятся в настоящее время, модель будет усовершенствоваться.

Излучение радиоактивно загрязненных грунтов

Пространственное распределение излучения, создаваемое радиоактивно загрязненными грунтами, имеет ряд особенностей. Наиболее интересным представляется тот факт, что при определенном взаимном расположении загрязненного участка и точки наблюдения может наблюдаться рост значений МЭД с увеличением высоты. Это подтверждается и экспериментальными данными (рис. 1). В некоторых случаях наблюдается систематическое уменьшение МЭД с высотой.

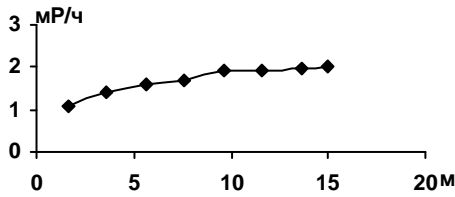


Рис. 1. Зависимость МЭД от высоты на стройплощадке санпропускника.

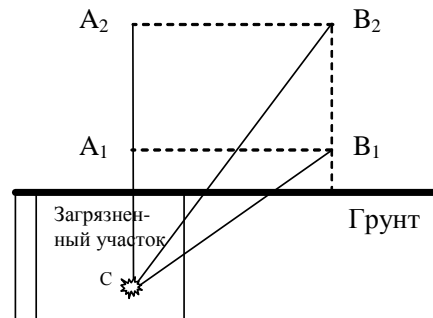


Рис. 2. Излучение загрязненного участка грунта.

Для объяснения этого явления обратимся к рис. 2. A_1, A_2, B_1, B_2 - точки наблюдения. Для удобства выделим в загрязненном участке грунта некоторый малый излучающий объем, находящийся в точке C . Размеры этого объема выберем достаточно малыми, так, чтобы его можно было считать точечным источником. Ясно, что МЭД, создаваемая загрязненным участком грунта, есть алгебраическая сумма МЭД, создаваемых всеми такими элементарными источниками, составляющими объем участка.

Рассмотрим МЭД, создаваемую этим объемом. Прежде всего заметим, что МЭД в точке наблюдения определяется двумя факторами: ослаблением с расстоянием и ослабле-

нием в самом источнике (грунте). При этом ослабление в слое грунта зависит от расположения точки наблюдения относительно загрязненного участка (см. рис. 2).

Если точка наблюдения находится над загрязненным участком (точки A_1 и A_2), то ослабление в слое грунта, очевидно, не зависит от высоты точки наблюдения. Так, для точек A_1 и A_2 ослабление в грунте будет одинаковым. Ясно, что в этом случае с увеличением высоты МЭД будет уменьшаться, асимптотически приближаясь к зависимости $1/r^2$ на больших расстояниях.

Иная ситуация будет иметь место в случае, когда точка наблюдения находится в стороне от загрязненного участка. В этом случае ослабление в слое грунта для точки B_2 , которая находится выше, меньше, чем для точки B_1 . Таким образом, при определенном соотношении таких параметров, как коэффициент ослабления и толщина слоя, возможна ситуация, когда уменьшение МЭД с увеличением расстояния до точки наблюдения будет скомпенсировано уменьшением фактора ослабления. В такой ситуации возможен рост МЭД с высотой.

Ясно, что этот эффект будет наиболее выраженным для слоя небольшой толщины. Также очевидно, что с увеличением высоты уменьшение фактора ослабления прекратится, и в дальнейшем будет наблюдаться уменьшение МЭД с высотой. Как и в предыдущем случае, эта зависимость асимптотически будет приближаться к $1/r^2$, т.е. на зависимости МЭД от высоты будет участок роста, сменяющийся в дальнейшем плавным уменьшением.

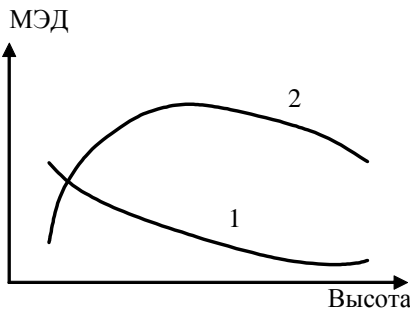


Рис. 3. Схематическая зависимость МЭД от высоты: 1 - над загрязненным участком; 2 - в стороне от загрязненного участка.

Таким образом, приходим к выводу, что характер изменения МЭД с высотой зависит от расположения точки наблюдения относительно загрязненного «пятна» (рис. 3). Формирование пространственного распределения МЭД обусловлено конкурирующим воздействием ослабления излучения в слое грунта и ослаблением с расстоянием. Именно соотношение этих факторов определяет результирующее распределение излучения.

Данные рассуждения остаются справедливыми и в случае, если имеется не отдельный загрязненный участок, а область с неравномерным загрязнением.

Перейдем теперь от качественного рассмотрения к математической модели излучения, создаваемой радиоактивно загрязненными грунтами.

Математическая модель излучения радиоактивно загрязненного грунта

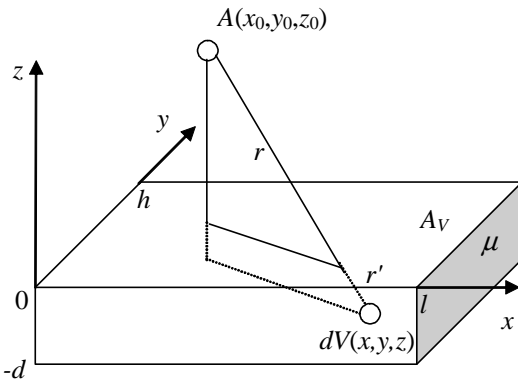


Рис. 4. Излучение участка загрязненного грунта.

Исходными данными для математической модели являются геометрические размеры участка: длина l и ширина h , толщина загрязненного слоя d , коэффициент линейного поглощения грунта μ , распределение активности по объему $A_V(x, y, z)$, а также параметры, характеризующие рассеянное излучение. Геометрия задачи представлена на рис. 4.

МЭД, создаваемая в точке наблюдения элементарным объемом dV , определяется соотношением

$$dH = \Gamma_H A_V(x, y, z) \frac{B(\mu r') e^{-\mu r'}}{r^2} dV, \quad (2)$$

где r - расстояние от точки наблюдения до элементарного объема dV ; r' - отрезок, проходимый излучением в грунте; B - фактор накопления, учитывающий рассеянное в грунте излучение; Γ_H - гамма-постоянная по мощности эквивалентной дозы.

Из рассмотрения геометрии задачи следует соотношение для r'

$$r' = \frac{|z|}{z_0 + |z|} r. \quad (3)$$

Для проведения расчетов по формуле (2) необходимо воспользоваться фактором накопления в аналитическом виде. Наиболее удобными и широко используемыми аналитическими аппроксимациями фактора накопления являются двухэкспоненциальное представление, трехэкспоненциальное представление и формула Бергера [1]. Воспользуемся формулой Бергера, имеющей достаточно простой аналитический вид и вместе с тем обеспечивающей достаточную точность:

$$B(\mu r) = 1 + a\mu r \exp(b\mu r). \quad (4)$$

Здесь a и b - константы, зависящие от энергии гамма-квантов и состава грунта. С учетом соотношений (2), (3) и (4) мощность эквивалентной дозы, создаваемая в точке наблюдения всем участком, дается следующим выражением:

$$H(x, y, z) = \Gamma_H \int_0^l dx \int_0^h dy \int_{-d}^0 dz A_V(x, y, z) B\left(\mu \frac{|z|}{|z| + z_0}\right) \frac{e^{-\mu \frac{|z|}{|z| + z_0} \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}. \quad (5)$$

Используя полученное соотношение, можно определить МЭД в заданной точке над поверхностью грунта или иного объекта с объемным загрязнением.

Необходимо заметить, что полученное выражение не может быть использовано для расчета МЭД на малом расстоянии от поверхности грунта, поскольку знаменатель подынтегрального выражения в (5) при приближении к поверхности неограниченно растет, а на самой поверхности интеграл расходится. Таким образом, использовать полученное соотношение для численных расчетов на малых расстояниях нецелесообразно. Подобное ограничение свойственно и ряду других программ, основанных на использовании формулы для излучения точечного источника, например Microshield. Для расчета МЭД на малых расстояниях можно применять расчетные методы, основанные на методе Монте-Карло, «CYCLONE» [2], MCNP, GEANT и др.

Результаты расчетов

Для расчетов с использованием соотношения (5) было разработано соответствующее программное обеспечение. Оно позволяет производить расчет пространственного распределения МЭД на основании данных по объемному загрязнению объекта. При этом расчет может выполняться для неравномерно загрязненных участков, содержащих «грязные» пятна и т.п., тогда как программа Microshield позволяет рассчитывать мощность дозы только для случая равномерного загрязнения.

С целью верификации программы результаты расчетов при помощи данной программы сравнивались с результатами расчетов при помощи программы Microshield. Для сравнения использовался модельный источник со следующими параметрами: $l = h = 1$ м, $d = 1$ м, $\mu = 15$ м⁻¹, $a = 1,4474$, $b = 0,08932$. Результаты расчетов приведены в таблице.

Можно отметить хорошее совпадение результатов расчетов, что подтверждает корректность используемой методики.

Разработанное программное обеспечение использовалось для расчета пространственного распределения излучения для участков загрязненной поверхности. В частности, был осуществлен расчет МЭД для монтажной зоны объекта «Укрытие» после удаления загрязненного грунта. При этом учитывался вклад в МЭД излучения от объекта «Укрытие» и от окружающей радиоактивно загрязненной территории. Для оценки вклада излучения объекта «Укрытие» использовалось соотношение (1), а для расчета излучения грунта - соотношение (5).

Сравнение расчетов МЭД для модельного источника

Высота над поверхностью участка, м	Microshield, мГр/ч	Картограмма, мГр/ч
1	2,616	2,86
2	1,012	1,11
3	$5,11 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$
4	$3,01 \cdot 10^{-1}$	$3,33 \cdot 10^{-1}$
5	$1,99 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$
6	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$
7	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$
8	$8,01 \cdot 10^{-2}$	$8,91 \cdot 10^{-2}$
9	$6,35 \cdot 10^{-2}$	$7,08 \cdot 10^{-2}$
10	$5,15 \cdot 10^{-2}$	$5,76 \cdot 10^{-2}$

На рис. 5 приведена расчетная картограмма МЭД после удаления грунта из монтажной зоны объекта «Укрытие».

На рис. 6 приведена зависимость средней МЭД по монтажной зоне НБК от высоты.

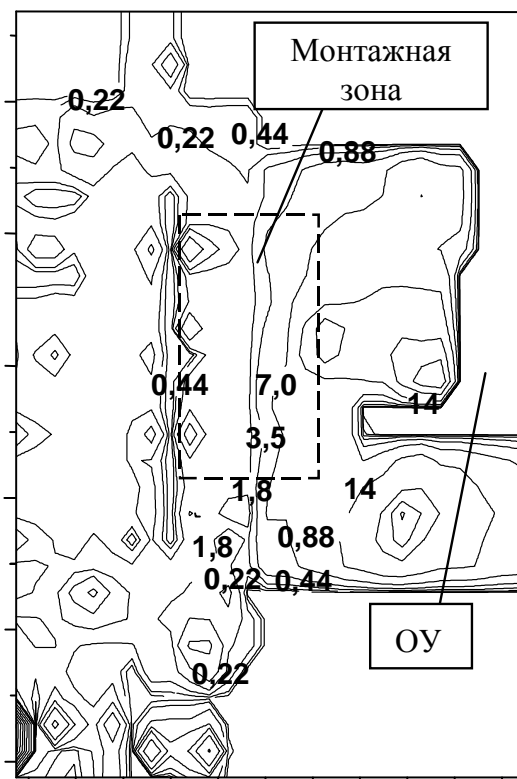


Рис. 5. Картограмма распределения МЭД (мР/ч) на высоте 1 м в районе монтажной зоны НБК.

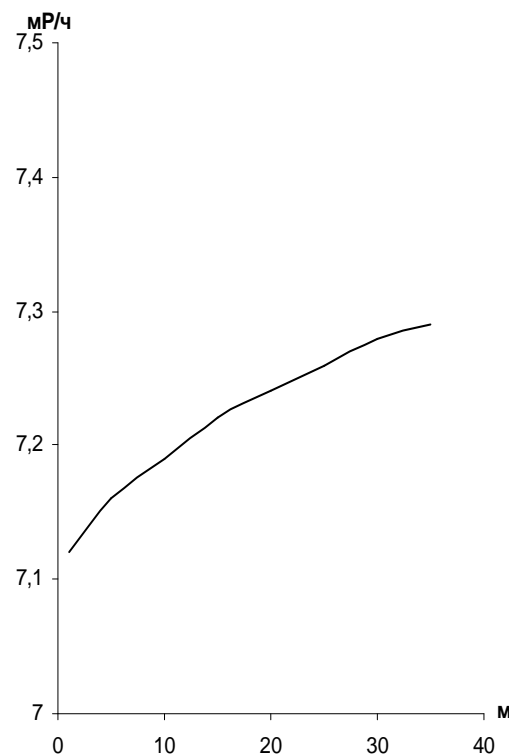


Рис. 6. Зависимость средней МЭД от высоты в районе монтажной зоны НБК.

Проведенные расчеты показывают, что радиационная обстановка в районе монтажной зоны строительства НБК после удаления загрязненного слоя грунта будет преимущественно определяться излучением объекта «Укрытие» и в меньшей степени источниками в локальной зоне. Среднее значение МЭД по монтажной зоне изменяется в пределах 7,1 - 7,3 мР/ч и слабо зависит от высоты.

Выводы

Предлагаемая математическая модель излучения радиоактивно загрязненного участка грунта позволяет рассчитывать МЭД для больших участков местности, имеющих неравномерное загрязнение. Данный подход может быть использован при планировании производства работ, проектировании зданий и сооружений, для прогнозирования изменения радиационной обстановки, расчета дозовых нагрузок и коллективной эффективной дозы персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машикович В.П.* Защита от ионизирующих излучений: Справ. - 3-е изд. - М.: Энергоиздат, 1982. - 296 с.
2. *Батий В.Г., Кузьменко В.А., Рудько В.М.* Комплекс программ CYCLONE для решения задач, связанных с проблемами радиоактивных отходов чернобыльского происхождения, методами математического моделирования // Проблемы Чернобиля. - 2000. - Вып. 6. - С. 192.

Поступила в редакцию 14.10.04,
после доработки - 11.11.04.