

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики активных зон критических сборок

Характеристика	КБР-14	КБР-15	БФС-54	БФС-61
Топливо	UO ₂	UO ₂	UO ₂	PuUO ₂
Содержание основного делящегося изотопа	0,19	0,89	0,21	0,16
Объемная доля:				
топлива	0,18	0,02	0,4	0,3
стали	0,82	0,98	0,25	0,2
натрия	—	—	0,35	0,5*
Доля нейтронов ниже 10 кэВ	0,13	0,16	0,09	0,05

*В состав активной зоны вместо натрия входит свинец.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения доплер-эффекта реактивности ($D = \rho_r/\rho_x - 1$)

Сборка	Образец	
	UO ₂ , длина 110, диаметр 20 мм, масса 305 г, масса контейнера 16 г	PuO ₂ , получен в ВВЭР, длина 112, диаметр 4,8 мм, масса 9,7 г, масса контейнера 10,8 г
КБР-14	0,097±0,008	
КБР-15	0,087±0,006	
БФС-54	0,073±0,011	0,005±0,015
БФС-61	0,031±0,003	0,016±0,005

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukayama T., Okajima S. Neutron spectrum dependence of natural UO₂ doppler effect measured in FCA. — Nucl. Sci. Technol., 1983, v. 22, № 3, p. 243.
2. Тамбовцев С.Д., Дулин В.А. Изучение доплер-эффекта ²³⁸U и плутония в быстрых критических сборках. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 1991, вып. 4, с. 85—90.
3. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоиздат, 1981.
4. Okajima S. Analysis of Doppler Effect Measurement in FCA Cores using JENDL-3.2 Library. PHYSOR-96, E-247.
5. Дулин В.А. Оценка экспериментального возмущения критичности реакторов при внесении малых образцов. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 2, с. 79—82.
6. Бедняков С.М., Дулин В.А., Мантуров Г.Н. и др. Проверка нейтронных данных для изотопов плутония в экспериментах на быстрых физических сборках. — Там же, 1996, т. 80, вып. 6, с. 454.
7. Бедняков С.М., Безбородов А.А., Дулин В.А. и др. Проверка некоторых реакторных функционалов в экспериментах на быстрых критических сборках. — Там же, 1990, т. 69, с. 68—73.

Поступила в Редакцию 10.03.2000

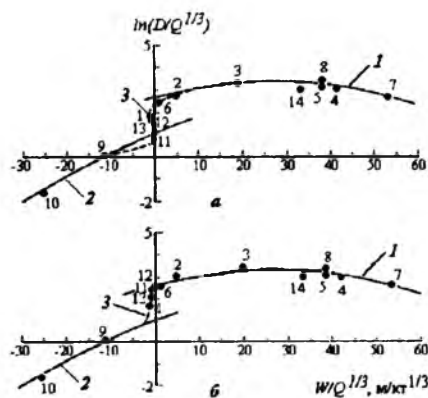
УДК 621.039.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОРОНКИ ВЫБРОСА ПРИ ЯДЕРНОМ ВЗРЫВЕ

Фокин В.А. (Горный институт Кольского научного центра РАН)

Многолетний опыт взрывов на выброс с использованием зарядов обычных химических взрывчатых веществ позволил накопить богатый статистический материал, результатом обобщения которого явилась известная расчетная формула

$$Q = q_b W^m F(n), \quad (1)$$



Р и с. 1. Распределение экспериментальных точек Y_D без выравнивания (а) и с выравниванием данных (б)

илучшие результаты дает предложенная [2] зависимость $F(n) = 0,25 (1 + n^2)^2$ при уточненных значениях $q_b = 6,63 \text{ кг/м}^3$ и $m = 3,16$. Следует отметить, что такой методический подход является лишь способом адаптации известной формулы применительно к принципиально новым условиям взрывания и не позволяет объяснить некоторые существенные различия между необходимыми энергозатратами при взрывах на выброс с применением химических и ядерных взрывчатых веществ.

Интерес могут представлять выводы, полученные при ином методическом подходе к оценке параметров образуемой воронки выброса. Сущность решения задачи заключается в следующем. Помимо показателя выброса, который связывает между собой радиус воронки (R , м) и глубину размещения заряда, с практической точки зрения значимым параметром является видимая глубина воронки (D , м). На рис. 1, а показано распределение экспериментальных данных (табл. 1) в координатах $X = W/Q^{1/3}$ и $Y = \ln(D/Q^{1/3})$. Хорошо видно наличие двух областей (подземные и воздушные взрывы), в пределах которых могут быть использованы аппроксимирующие зависимости общего вида

$$Y_D = a_D + b_DX - c_DX^2. \tag{2}$$

Т а б л и ц а 1. Основные характеристики нескольких ядерных взрывов [3—12]

Название	Порода	Q , кг	W , м	R , м	D , м	n , отн. ед.
Джангл С	Аллювий	1,2	—1,06	13,7	6,4	—
Джангл У	»	1,2	5,2	39,6	16,2	7,62
Типот ЕСС	»	1,2	20,4	44,5	27,5	2,18
Седан	»	100	194	185	97	0,95
Дэнии Бой	Базальт	0,5	30,5	33,6	19,2	1,1
Джонни Бой	»	0,5	0,55	18	9,14	32,73
Паланкин	Риолит	4	85	36,5	24	0,43
Кабриолет	»	2,5	52	54	36,5	1,04
Тринити	Сухой песок	20	—30	167,8	2,9	—
Гринхауз Изи	Коралловый песок	46,7	—91,5	127,5	0,7	—
Иви Майк	»	14 000	—10,7	951,6	50	—
Кэстл 1	»	15 000	—2,1	915	73,2	—
Кэстл 3	»	100	—4,1	122	22,9	—
Скунер	Туф	35	108	130	63,5	1,2

Примечание. Отрицательные значения W означают размещение заряда выше уровня дневной поверхности.

Для подземных взрывов (кривая 1) численные значения коэффициентов, входящих в формулу (2), следующие: $a_D = 2,6$; $b_D = 0,055$; $c_D = 0,001$ (индекс D означает принадлежность коэффициентов параметру видимой глубины воронки). Для воздушных взрывов (кривая 2) $a_D = 1$; $b_D = 0,085$; $c_D = 0,0005$.

Хорошо видно, что есть некоторая переходная область (приповерхностные, контактные и малозаглубленные взрывы), экспериментальные точки в которой расположены необычным образом (кривая 3), допускающим три решения функции $Y = f(X)$. Наличие такой зоны понятно — изменяется механизм разрушения и выноса грунта или породы за пределы образуемой воронки. Действительно, при подземном взрыве разрушение перемычки, отделяющей дневную поверхность от заряда, происходит под действием растягивающих усилий, движение основного объема разрушенного материала направлено в сторону дневной поверхности, боковая поверхность чаши воронки (поверхность скольжения выносимого материала) оказывает минимальное сопротивление. В случае приповерхностных и контактных взрывов разрушение происходит под действием сжимающих усилий, вынос разрушенного материала определяется его гидродинамическим течением по поверхности скольжения с резко возросшим сопротивлением движению, значительная часть разрушенного материала остается в воронке.

Вместе с тем в работе [13] показано, что при околоповерхностных взрывах в воронке остается аномально высокое, необъяснимое только упавшим обратно в воронку под действием силы тяжести количество разрушенного материала, толщина слоя (d , м) которого может быть получена по соотношению

$$d \approx 30,49 \cdot 10^{-3} R^{1,318}. \quad (3)$$

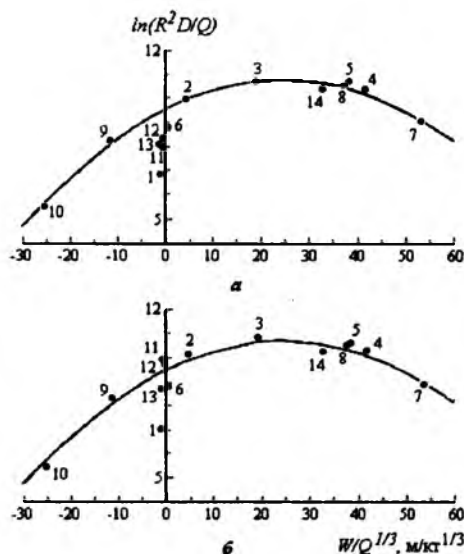
Можно предположить, что это тот объем разрушенного материала, который при нормальном механизме воронкообразования, характерном для обычных подземных взрывов, мог бы быть вынесен за пределы образованной воронки. Исходя из этого был выполнен пересчет (выравнивание) значений D , в результате чего распределение экспериментальных точек приобрело вид (см. рис. 1, б), допускающий только одно решение в переходной области: по мере увеличения высоты взрыва (при его постоянной мощности) или уменьшения мощности (при постоянной высоте) глубина воронки снижается.

Очевидно, что для описания одного и того же процесса воронкообразования должна существовать единая неразрывная и независимая от условий размещения заряда функция. В этой связи было проанализировано распределение экспериментальных точек в координатах $X = W/Q^{1/3}$ и $Y = \ln(R^2 D/Q)$. Смысл параметра Y очевиден: это величина, пропорциональная объему воронки и приведенная к весу заряда. Данное распределение показано на рис. 2, а, откуда следует, что для описания как подземных, так и воздушных взрывов может быть использована единая зависимость вида

$$Y_v = a_v + b_v X - c_v X^2, \quad (4)$$

где $a_v = 9,5$; $b_v = 0,1$; $c_v = 0,002$.

Для переходной области экспериментальные точки лежат ниже зависимости (4). Использование соотношения (3) позволило скоррелировать это отклонение (за исключением взрыва «Джангл С»), что свидетельствует о возможности описания одного и того же процесса



Р и с. 2. То же, что и на рис. 1, для Y_v

воронкообразования единой, независимой от условий размещения ядерного заряда функцией (см. рис. 2, б). Таким образом, удалось установить наличие единой зависимости (4), которая характеризует параметры воронки, образованной ядерным зарядом независимо от условий его размещения.

Одним из исходных параметров для определения веса заряда выброса по формуле (1) является нормальный удельный расход взрывчатых веществ на выброс (q_v). Используя соотношения (2) и (4), выполним преобразования относительно удельного расхода взрывчатых веществ в расчете на конусообразную воронку. В результате получаем формулу

$$q = \frac{3}{\pi} \frac{10^6}{X \exp(a_q + b_q X - c_q X^2)}, \quad (5)$$

где $a_q = a_v - a_D$; $b_q = b_v - b_D$; $c_q = c_v - c_D$.

Условие $dq/dX = 0$ дает возможность определить характерное значение $X = 36,281 \text{ м/кг}^{1/3}$, при котором параметр q имеет минимум, равный $19,332 \text{ кг/м}^3$. Показатель выброса, вычисленный с использованием зависимостей (2) и (4), равен 1,017. Это означает, что полученное значение $q_{\min}$ можно рассматривать как аналогичную характеристику нормального удельного расхода взрывчатых веществ на выброс, но уже применительно к подземным ядерным взрывам, перечисленным в табл. 1.

Для уточнения причин повышенных значений q_v при ядерных взрывах по сравнению с обычными химическими воспользуемся выводами работы [14], согласно которым вес сосредоточенного заряда выброса может быть определен следующим образом:

$$Q_v = q_v W^{3+\varphi} F(n); \quad (6)$$

$$q_v = \frac{1 - \eta_{\text{ост}}}{\eta_{\text{ост}}} q_n; \quad (7)$$

$$q_n = \sqrt{\frac{25\,740f}{(1 - \eta_{\text{ост}})U_{\text{уд}}}}; \quad (8)$$

$$F(n) = n^{1-\varphi/2}(1 - n + n^2)^{1+\varphi/2}, \quad (9)$$

где φ — параметр, комплексно учитывающий условия взрывания, отн. ед.; $\eta_{\text{ост}}$ — коэффициент остатка начальной энергии взрыва на момент полного расширения котловой полости, отн. ед.; q_n — нормальный удельный расход взрывчатых веществ, кг/м^3 ; f — коэффициент крепости породы по шкале М.М. Протоdjeяконова; $U_{\text{уд}}$ — удельная энергия взрывчатых веществ, кгм/кг .

Параметр φ определяется как

$$\varphi = \frac{\alpha}{1 - 0,723\alpha}; \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{2}{3} \ln(1 - \eta_{\text{ост}})^{-1}. \quad (11)$$

Значение $\eta_{\text{ост}}$ можно рассчитать по формуле

$$\eta_{\text{ост}} = \frac{\gamma_0 - 1}{k - 1} \frac{373}{\gamma_{\text{вв}}} \left(\frac{\sigma_*}{p_0} \right)^{(k-1)/k}; \quad (12)$$

$$p_0 = (\gamma_0 - 1)\gamma_{\text{вв}} U_{\text{уд}}; \quad (13)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{1 + (k^2 - 1)(\gamma_{\text{вв}}/373)^{1,2}}, \quad (14)$$

где γ_0 — начальный показатель адиабаты продуктов детонации, отн. ед.; σ_* — противодавление на глубине размещения заряда ($\sigma_* = 10^6 f + \gamma_n W$, где γ_n — объемный вес породы, кг/м³), кг/м²; k — минимальный показатель адиабаты продуктов детонации ($k = 1,4$), соответствующий минимальному объемному весу взрывчатых веществ, равному 373 кг/м³, отн. ед.; $\gamma_{вв}$ — объемный вес взрывчатых веществ, кг/м³; p_0 — начальное давление продуктов детонации, кг/м².

Применительно к ядерным взрывам в качестве параметра $\gamma_{вв}$ используем значение, характерное для металлического урана (18 700—19 600 кг/м³). Поскольку количество энергии, выделенной при взрыве ядерного заряда, исчисляется в тротиловом эквиваленте, в качестве параметра $U_{уд}$ примем удельную энергию тротила $4,526 \cdot 10^5$ кдж/кг. Результаты расчетов приведены в табл. 2 (в скобках даны для сравнения соответствующие значения для химического взрывчатого вещества с удельной энергией тротила и объемным весом 900—1550 кг/м³).

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета параметров по формулам (5)—(10)

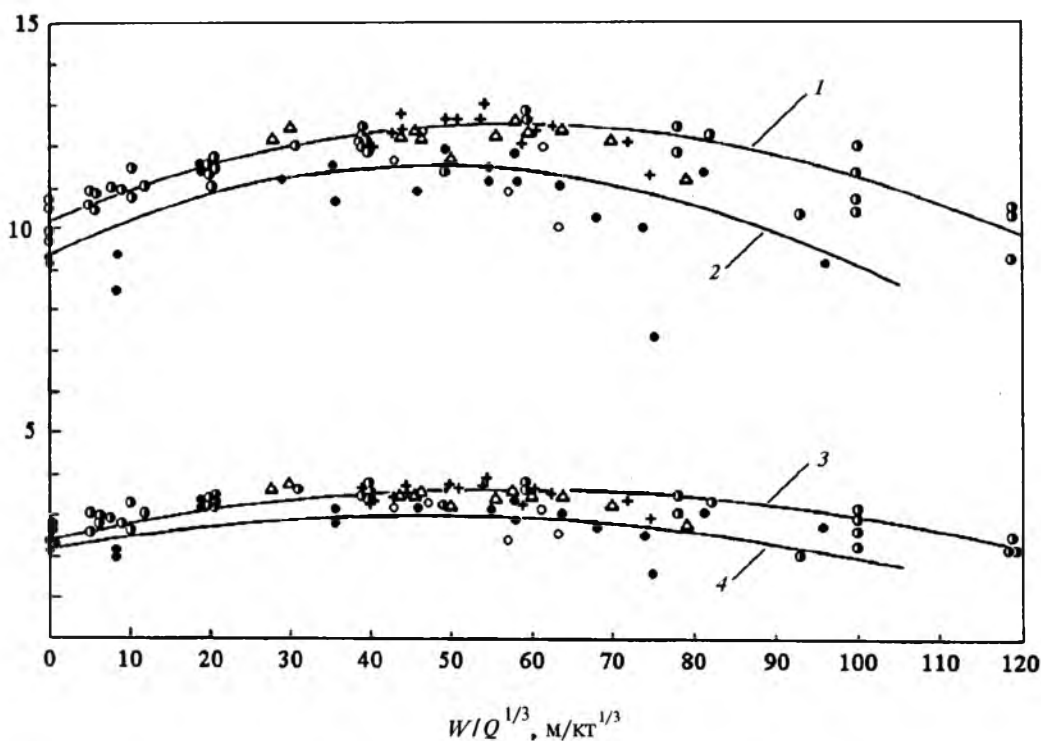
Порода	$\eta_{ост}$, ед	q_n , кг/м ³	q_v , кг/м ³	φ , отн. ед.
Туф, аллювий ($f \approx 3$)	0,0254—0,0244 (0,244—0,170)	0,418—0,418 (0,475—0,453)	16,082—16,719 (1,474—2,213)	0,0173—0,0167 (0,215—0,136)
Риолит ($f \approx 9,8$)	0,0356—0,0342 (0,342—0,238)	0,761—0,760 (0,920—0,855)	20,627—21,438 (1,773—2,732)	0,0246—0,0236 (0,349—0,209)
Базальт ($f \approx 14$)	0,0394—0,0379 (0,378—0,264)	0,910—0,910 (1,132—1,040)	22,210—23,097 (1,860—2,899)	0,0273—0,0262 (0,411—0,240)

Примечание. Для ядерных взрывов первое значение параметра соответствует объемному весу взрывчатого вещества 18 700 кг/м³, второе — 19 600 кг/м³, для химических — 900 кг/м³ (насыпное) и 1550 кг/м³ (литой тротил).

Как видно из полученных расчетных данных, для приведенных в табл. 1 восьми взрывов (второго — восьмого, четырнадцатого) средневзвешенный удельный расход взрывчатых веществ на выброс составляет 18,750—19,493 кг/м³, что соответствует ранее определенному из уравнения (5) 19,332 кг/м³. При этом показатель степени $m = 3 + \varphi$ с достаточной для практических расчетов точностью может быть принят равным трем (в связи с чем использование значения $m = 3$ при анализе распределения экспериментальных точек представляется корректным).

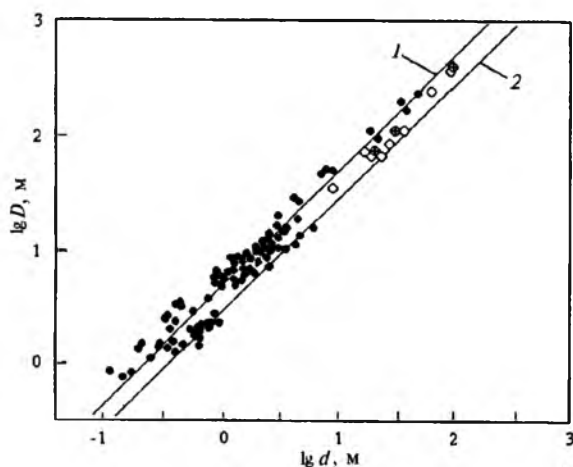
Из табл. 2 также видно, что удельный расход взрывчатых веществ на выброс при использовании ядерных зарядов в 7—12 раз выше значения q_v для зарядов химических веществ. Для проверки этого факта были использованы опубликованные в работе [5] экспериментальные данные о 112 подземных взрывах зарядов химических веществ (графически эти данные представлены на рис. 3 в тех же координатах, что и на рис. 1, 2). При этом получены следующие значения коэффициентов, входящих в формулы (2) и (4): для лёсса, глины, аллювия и туфа (кривая 1) $a_v = 10,2$, $b_v = 0,0831$, $c_v = 6,92 \cdot 10^{-4}$, $a_D = 2,4$, $b_D = 0,0461$, $c_D = 3,85 \cdot 10^{-4}$, для базальта (кривая 2) 9,4, 0,0909, $9,09 \cdot 10^{-4}$, 2,2, 0,0364, $3,64 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Условие $dq/dX = 0$ дает возможность определить для лёсса, глины, аллювия и туфа (кривая 3) $X = 80,494$ м/кг^{1/3}, $q_{min} = 1,808$ кг/м³, $n = 1,006$, для базальта (кривая 4) 64,274 м/кг^{1/3}, 3,173 кг/м³, 1,065 соответственно.

Как видим, ранее полученное для ядерных взрывов $q_{min} = 19,332$ кг/м³ действительно больше (в 6—10 раз в зависимости от крепости пород), чем для зарядов химических взрывчатых веществ, что согласуется с данными табл. 2.



Р и с. 3. Распределение экспериментальных точек Y_v (1, 2) и Y_D (3, 4) для химических взрывчатых веществ

На рис. 4 приведены представленные в работе [15] данные, характеризующие взаимосвязь между диаметром (D , м) и глубиной (d , м) взрывных воронок от бомб и снарядов обычных химических взрывчатых веществ (●). Здесь же дополнительно показано распределение для ядерных взрывов, полученное по данным табл. 1 (подземные взрывы ○), и для трех отечественных ядерных взрывов (⊕, [16, 17]). Кривая 1 соответствует контактному взрыву ($X = 0$ м/кт^{1/3}), кривая 2 — условиям, при которых наблюдается максимум объема образуемой воронки ($X = 36,283$ м/кт^{1/3}). Как видим, характер распределения фактических точек соответствует расчетной области, ограниченной кривыми 1 и 2, что подтверждает единство механизма воронкообразования при взрыве зарядов химических взрывчатых веществ и ядерных устройств, но при разных энергозатратах.



Р и с. 4. Сопоставление фактического и расчетного распределения глубины и диаметра взрывных воронок

Таким образом, даже с учетом погрешностей определения начальных условий и результатов измерений фактических параметров образованной воронки можно сделать вывод о том, что при наблюдаемом единстве механизма воронкообразования энергетические затраты продуктов детонации ядерного заряда на разрушение и выброс породы примерно в 10 раз меньше, чем для зарядов химических взрывчатых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чухин С.Г. Анализ формул для определения показателя действия подземного ядерного взрыва на выброс. — Атомная техника за рубежом, 1994, № 7, с. 9—12.
2. Покровский Г.И. Взрыв. М.: Недра, 1967. 173 с.
3. Джонсон Г., Хиггинс Г., Вайолет К. Подземные ядерные взрывы. — В сб.: Подземные ядерные взрывы. М.: Изд-во ин. лит., 1962, с. 11—35.
4. Киреев В.В., Ершов Н.Н., Протопопов Д.Д. Промышленные ядерные взрывы (зарубежные исследования). М.: Атомиздат, 1971. 175 с.
5. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971. 224 с.
6. Russell P. Contemporary digest. Nuclear explosives in mining. — Mining & Minerals Engng, 1965, v. 1, № 5, p. 167.
7. Russell P. Stripping overburden with nuclear explosives. — Mining Engng, 1964, v. 16, № 6, p. 76—80.
8. Nordyke M. An analysis of cratering data from desert alluvium. — J. Geophys. Res., 1962, v. 67, № 5, p. 1965—1974.
9. Vaile R. Pacific craters and scaling laws. — Ibid., 1961, v. 66, № 10, p. 3413—3438.
10. Nordyke M. Nuclear craters and preliminary theory of the mechanics of explosive crater formation. — Ibid., 1961, v. 66, № 10, p. 3439—3459.
11. Murphey B., Vortman L. High-explosive craters in desert alluvium, tuff and basalt. — Ibid., 1961, v. 66, № 10, p. 3389—3404.
12. Ершов Н.Н., Молчанов П.В. Энергия атомного взрыва в горном деле. М., ИГД им. А.А. Скочинского, 1965. 39 с.
13. Orphal D. Depth, thickness and volume of the breccia lens for simple explosion and impact craters. — In: Lunar and Planetary Sciences X. Huston: Lunar and Planetary Institute, 1979, p. 949—951.
14. Фокин В.А. О некоторых закономерностях расчета параметров взрыва на выброс. — В сб.: Вопросы разрушения горных пород взрывом. Апатиты, 1993, с. 82—98.
15. Бронштэн В.А. Развитие взглядов на происхождение кольцевых структур на планетах и современное состояние проблемы. — В кн.: Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука, 1979, с. 7—30.
16. Кедровский О.Л., Иванов И.Я., Мясников К.В. и др. Основные технические аспекты использования подземных ядерных взрывов в народном хозяйстве. — В кн.: Атомные взрывы в мирных целях. М.: Атомиздат, 1970, с. 5—51.
17. Мясников К.В., Прозоров Л.Б., Ситников И.Е. Механическое действие одиночных и групповых подземных ядерных взрывов на выброс и исследование инженерно-технических свойств выемок этих взрывов. — Там же, с. 52—74.

Поступила в Редакцию 30.09.98

УДК 621.039.5

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Осмачкин В.С. (Институт проблем безопасного использования
ядерной энергии РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Как известно, современная ядерная энергетика переживает трудное время стагнации, порожденное общественным неприятием ядерной технологии. Восстановление доверия общества к возможностям безопасного экономически эффективного, социально приемлемого производства энергии на АЭС — важная задача современного научно-технического сообщества. Многое будет зависеть от того, насколько успешно будут решаться вопросы радиационной безопасности, рационального нормирования и оценок последствий радиационных воздействий.

Известны преимущества ядерной энергетики по сравнению с энергетикой на органическом ископаемом топливе: высокая калорийность топлива и малые транспортные расходы, независимость от источников добычи сырья, относительно малое количество отходов, непотребление кислорода и ничтожная генерация парниковых газов, качественное научное сопровождение и высокая культура эксплуатации, экономическая эффективность производства, освоенная промышленная технология изготовления ком-