

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВАМИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В РУКАВАХ СО СПЕЦИАЛЬНОЙ ЖИДКОЙ ДОБАВКОЙ

*К. В. Лотоус, инж. (ОАО «Полтавский ГОК»)*

*Наведено результати опрацювання експериментальних даних, отриманих під час вибухів біля денної поверхні в умовах кар'єру Полтавського ГЗК подовжених зарядів нових промислових вибухових речовин поліміксів та комполайтів зі спеціальною рідкою добавкою і грамоніту 79/21 в рукавах. Установлено ефективність руйнування скельних порід вибухами поліміксів та комполайтів порівняно з еталонним грамонітом 79/21.*

В последнее время различные научные и производственные организации проводят поиск рациональных промышленных бестротилового взрывчатых веществ (ВВ), средств их изготовления и заряжания [1, 2]. В частности, в [1] разработаны физико-технические основы разрушения скальных пород взрывами скважинных зарядов ВВ в рукавах. В качестве ВВ использовался грамонит 79/21, а также полимиксы и комполайты, разработанные ЗАО «Техновзрыв».

В развитие результатов [1] в работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований свойств жидких добавок холодного приготовления и их влияния на физико-химические и взрывчатые свойства промышленных ВВ полимиксов и комполайтов. На основании данных специально проведенных экспериментов исследуем эффективность дробления скальной породы взрывами зарядов из полимиксов и комполайтов с жидкой добавкой.

Известно [3–6], что при определенных глубинах заложения заряда основными полезными формами работы, совершаемой взрывом, являются: работа дробления и работа перемещения или выброса горной массы. Очевидно, что необходимым, хотя и недостаточным, условием образования воронки выброса в массиве полускальной или скальной горной породы является ее достаточное разрушение в пределах воронки выброса.

Затраты энергии ВВ на полезные механические формы работы запишем в виде [3]

$$fQ_{\text{ВВ}}m_{\text{ВВ}} = E_{\text{д}} + E_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент полезного использования энергии ВВ на механические формы работы при воронкообразовании;  $Q_{\text{ВВ}}$  – удельная теплота взрыва ВВ, Дж/кг;  $m_{\text{ВВ}}$  – масса ВВ, кг;  $E_{\text{д}}$ ,  $E_{\text{в}}$  – затраты энергии соответственно на дробление и выброс породы, Дж.

Из (1) следует

$$f = \frac{E_d}{m_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}} + \frac{E_b}{m_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}} \text{ или } f = f_d + f_b, \quad (2)$$

где  $f_d$ ,  $f_b$  – коэффициенты полезного использования энергии взрыва заряда соответственно на дробление и выброс породы.

Затраты энергии на дробление определяются в виде [4–6]

$$E_d = q_s V_d, \quad (3)$$

где  $q_s$  – удельная энергоемкость разрушения пород в рассматриваемой зоне дробления, Дж/м<sup>3</sup>;  $V_d$  – объем зоны дробления пород, м<sup>3</sup>.

Тогда с учетом (2)

$$f_d = q_s \frac{V_d}{m_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}}. \quad (4)$$

Согласно Г. И. Покровскому [3]

$$f_b = \frac{\rho_{\text{п}} g}{2 Q_{\text{ВВ}} m_{\text{ВВ}}} h_b V_b, \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_b$  – глубина воронки выброса, м;  $V_b$  – объем воронки выброса, м<sup>3</sup>.

Учитывая большие сложности в установлении размеров зоны разрушения исходя из общих позиций действия взрыва вблизи дневной поверхности, примем следующие допущения и ограничения. Очевидным является тот факт, что для подрыва следует брать удлиненные заряды ( $L_3 > 5d_3$ ), по конструкции аналогичные реальным (например, в рукаве с зазором относительно стенок скважины). Неоднозначными при этом являются расположение этого заряда относительно поверхности и определение связанного с этим объема разрушения породы, по которому будет оцениваться эффективность действия взрыва заряда. В этом случае определим параметры проведения эксперимента, когда зона разрушения в области заряда и дневной поверхности близка к цилиндрической. Это условие может быть выполнено путем установления геометрических размеров удлиненного заряда и его заглубления относительно дневной поверхности. В работе [1] показано, что такое условие выполняется при стабилизации высоты заряда  $L_3$  в пределах 1,0...1,5 м и при ее колебании относительно заглубления донной части заряда  $H_c$  в пределах 0,4...0,6.

При таких условиях эксперимента, учитывая необходимость анализа его результатов с позиций уточнения расстояния взаимного расположения цилиндрических удлиненных зарядов в массиве пород, в качестве оценки размеров зоны дробления может быть признан цилиндрический объем породы в пределах радиуса дробления, ограниченный по глубине уровнем донной части заряда. При этом важнейшим является условие идентичности геометрических параметров эталонного и испытываемого зарядов и их расположение в массиве пород. Схема экспериментального заряда приведена на рис. 1.

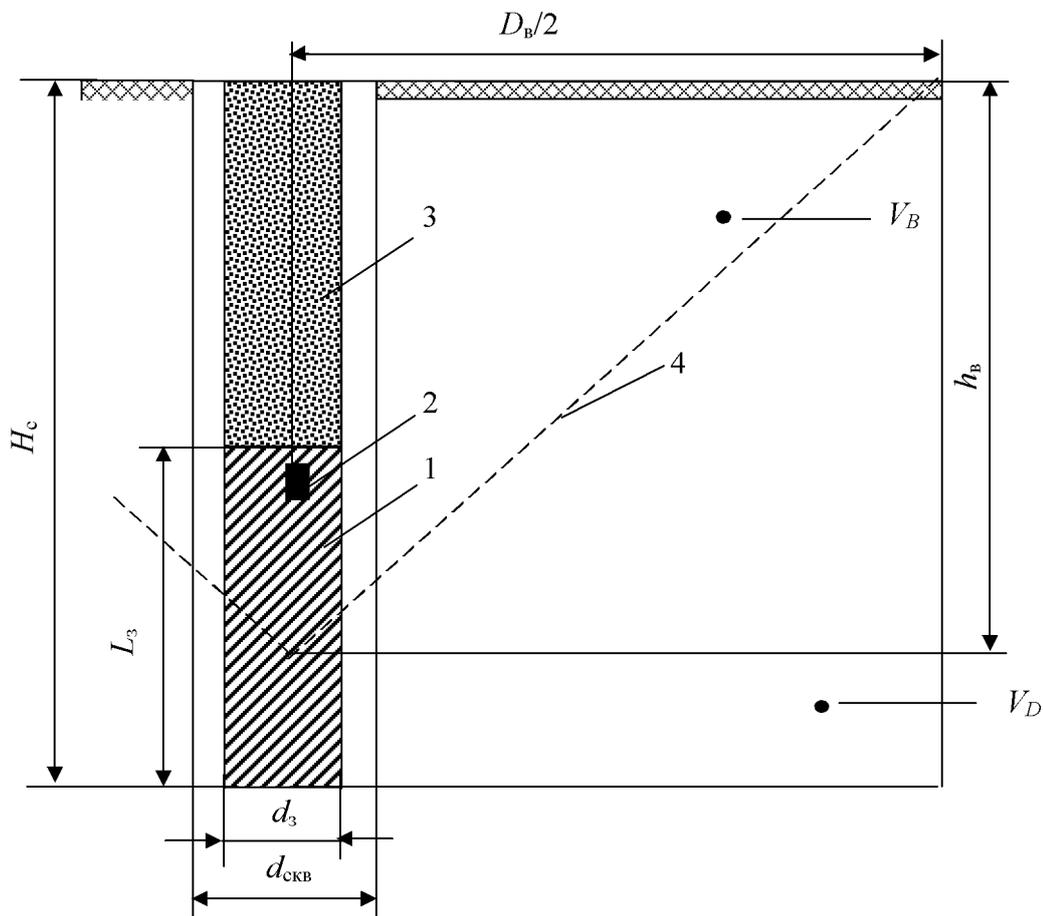


Рис. 1. Схема экспериментального заряда: 1 – заряд ВВ; 2 – боевик; 3 – забойка; 4 – контур воронки выброса;  $V_B$  и  $V_D$  – объем воронки выброса и зоны разрушения;  $L_3$  и  $d_3$  – длина и диаметр заряда;  $H_c$  – глубина скважины;  $D_B$  и  $h_B$  – диаметр и глубина воронки

В соответствии с указанными допущениями и ограничениями с учетом (4) и (5) можно определить следующие критерии эффективности действия взрыва испытуемого заряда относительно эталонного, составленного из граммонита 79/21.

1. Критерий относительной эффективности использования энергии взрыва заряда ВВ на дробление пород (относительный коэффициент использования энергии взрыва на дробление пород)

$$\mathcal{E}_{дф} = \frac{f_{д}}{f_{дэ}} = \frac{m_э Q_э V_{д}}{m_{ВВ} Q_{ВВ} V_{дэ}} = \frac{m_э Q_э}{m_{ВВ} Q_{ВВ}} \left( \frac{D_B}{D_э} \right)^2. \quad (6)$$

2. Критерий относительной эффективности единицы массы заряда ВВ при дроблении пород (относительная удельная эффективность взрыва заряда при дроблении пород)

$$\mathcal{E}_{дм} = \frac{f_{д} Q_{ВВ}}{f_{дэ} Q_э} = \frac{m_э V_{д}}{m_{ВВ} V_{дэ}} = \frac{m_э}{m_{ВВ}} \left( \frac{D_B}{D_э} \right)^2. \quad (7)$$

3. Критерий относительной эффективности удельного объема заряда ВВ при дроблении пород (относительная объемная эффективность взрыва заряда при дроблении пород)

$$\mathfrak{E}_{dv} = \frac{f_d Q_{BB} \rho_{BB}}{f_3 Q_3 \rho_3} = \frac{v_{BB} V_d}{v_3 V_3} = \frac{m_3 \rho_{BB}}{m_{BB} \rho_3} \left( \frac{D_B}{D_3} \right)^2. \quad (8)$$

4. Критерий относительной эффективности использования энергии заряда ВВ на перемещение пород (относительный коэффициент использования энергии взрыва заряда на перемещение пород)

$$\mathfrak{E}_{bf} = \frac{f_B}{f_{B3}} = \frac{m_3 Q_3 h_B V_B}{m_{BB} Q_{BB} h_{B3} V_{B3}} = \frac{m_3 Q_3}{m_{BB} Q_{BB}} \left( \frac{h_B D_B}{h_{B3} D_3} \right)^2. \quad (9)$$

5. Критерий относительной эффективности единицы массы заряда ВВ при перемещении пород (относительная удельная эффективность взрыва заряда при перемещении пород)

$$\mathfrak{E}_{bm} = \frac{f_B Q_{BB}}{f_{B3} Q_3} = \frac{m_3 h_B V_B}{m_{BB} h_{B3} V_{B3}} = \frac{m_3}{m_{BB}} \left( \frac{h_B D_B}{h_{B3} D_3} \right)^2. \quad (10)$$

6. Критерий относительной эффективности удельного объема заряда ВВ при перемещении пород (относительная объемная эффективность взрыва заряда при перемещении пород)

$$\mathfrak{E}_{bv} = \frac{f_B Q_{BB} \rho_{BB}}{f_{B3} Q_3 \rho_3} = \frac{v_{BB} h_B V_B}{v_3 h_{B3} V_{B3}} = \frac{m_3 \rho_{BB}}{m_{BB} \rho_3} \left( \frac{h_B D_B}{h_{B3} D_3} \right)^2, \quad (11)$$

где  $h_B$ ,  $D_B$  – соответственно глубина и диаметр воронки выброса, м;  $v$  – удельный объем ВВ, м<sup>3</sup>/кг. Индекс «э» в обозначениях показателей в формулах (6)–(11) обозначает, что они относятся к эталонному заряду ВВ.

Используя (2), (6), (9), можно получить выражение критерия относительной эффективности использования энергии взрыва заряда ВВ на механические формы работы (относительного коэффициента использования энергии взрыва заряда на механические формы работы) в виде

$$\mathfrak{E}_f = \frac{m_3 Q_3}{m_{BB} Q_{BB}} \left[ \left( \frac{D_B}{D_3} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{f_{B3}}{f_{d3}}} + \left( \frac{h_B D_B}{h_{B3} D_3} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{f_{d3}}{f_{B3}}} \right]. \quad (12)$$

Обозначив

$$K_{уд} = \frac{1}{1 + \frac{f_{B3}}{f_{d3}}}; \quad K_{уб} = \frac{1}{1 + \frac{f_{d3}}{f_{B3}}},$$

где, с учетом (4) и (5),

$$\frac{f_{B3}}{f_{d3}} = \frac{h_B \rho_{пг} g V_B}{2q_s V_d}, \quad (13)$$

получим

$$\mathcal{E}_f = \frac{m_3 Q_3}{m_{BB} Q_{BB}} \left[ K_{уд} \left( \frac{D_B}{D_3} \right)^2 + K_{ув} \left( \frac{h_B D_B}{h_3 D_3} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

С помощью аналогичных преобразований определим значения критерия относительной эффективности единицы массы заряда ВВ при механических формах работы (относительная удельная эффективность взрыва заряда при механических формах работы)

$$\mathcal{E}_m = \frac{m_3}{m_{BB}} \left[ K_{уд} \left( \frac{D_B}{D_3} \right)^2 + K_{ув} \left( \frac{h_B D_B}{h_3 D_3} \right)^2 \right] \quad (15)$$

и критерия относительной эффективности удельного объема ВВ на механические формы работы при разрушении горных пород взрывом удлиненных зарядов (объемная эффективность взрыва заряда при механических формах работы)

$$\mathcal{E}_V = \frac{m_3 \rho_{BB}}{m_{BB} \rho_3} \left[ K_{уд} \left( \frac{D_B}{D_3} \right)^2 + K_{ув} \left( \frac{h_B D_B}{h_3 D_3} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Предельные значения параметров, входящих в формулу (13), соответствующих условиям взрывания в слабых породах, равны:  $h_B \approx H_c$ ;  $\rho_{II} \approx 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_s = 40 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3$ ; а в трудновзрываемых –  $h_B \approx 0,5 H_c$ ,  $\rho_{II} \approx 3,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $q_s = 120 \cdot 10^3 \text{ Дж/см}^3$ .

При этих значениях параметров значения коэффициентов  $K_{уд}$  и  $K_{ув}$  в формулах (14)...(16) имеют значения (таблица).

Породы	Легко-взрываемые	Средне-взрываемые	Трудно-взрываемые
$K_{уд}$	0,85	0,90	0,95
$K_{ув}$	0,15	0,10	0,05

Исследования свойств ВВ полимикса ГР1/8, полимикса ГР4–Т10 с различным содержанием пористой селитры и компонента жидкого уплотняющего КЖУ марки К2, а также комполайта ГС6 проводились в карьере Полтавского ГОКа. Оценка свойств этих веществ осуществлялась методом воронкообразования по приведенной методике в породах средней взрываемости (сланцы кварц-слюдистые и кварц–роговообманковые, кварциты безрудные, метапесчаники).

Характерные зависимости относительных удельной эффективности дробления и удельной эффективности выброса полимикса ГР1/8 от содержания КЖУ марки К2 приведены на рис. 2. На рис. 3, 4 и 5 приведены удельный и объемный показатели эффективности использования энергии взрыва на механические формы работы скважинных зарядов соответственно полимикса ГР1/8, полимикса ГР4–Т10 с 10% пористой аммиачной селитры и полимикса ГР4–Т10 с 25% пористой аммиачной селитры. Цифрами на рис. 3, 4 и 5 обозначено: 1 – относительная удельная эффективность  $\mathcal{E}_m$ ; 2 – относительная

объемная эффективность  $\mathcal{E}_v$ ; 3 – эффективность эталонного ВВ – граммонита 79/21; 4 – минимальное содержание КЖУ (с 0,25% гуаргама), обеспечивающее продвижение смеси в рукаве в воде; 5 – минимальное содержание КЖУ (с 0,2% гуаргама и 0,2% мыла), обеспечивающее продвижение смеси в рукаве с воздушным барботированием окружающей воды; 6 – минимальное содержание КЖУ, исключающее фильтрацию воды в заряд через проколы в рукаве; 7 – зависимость  $Q_3/Q_{ВВ}$  от содержания КЖУ.

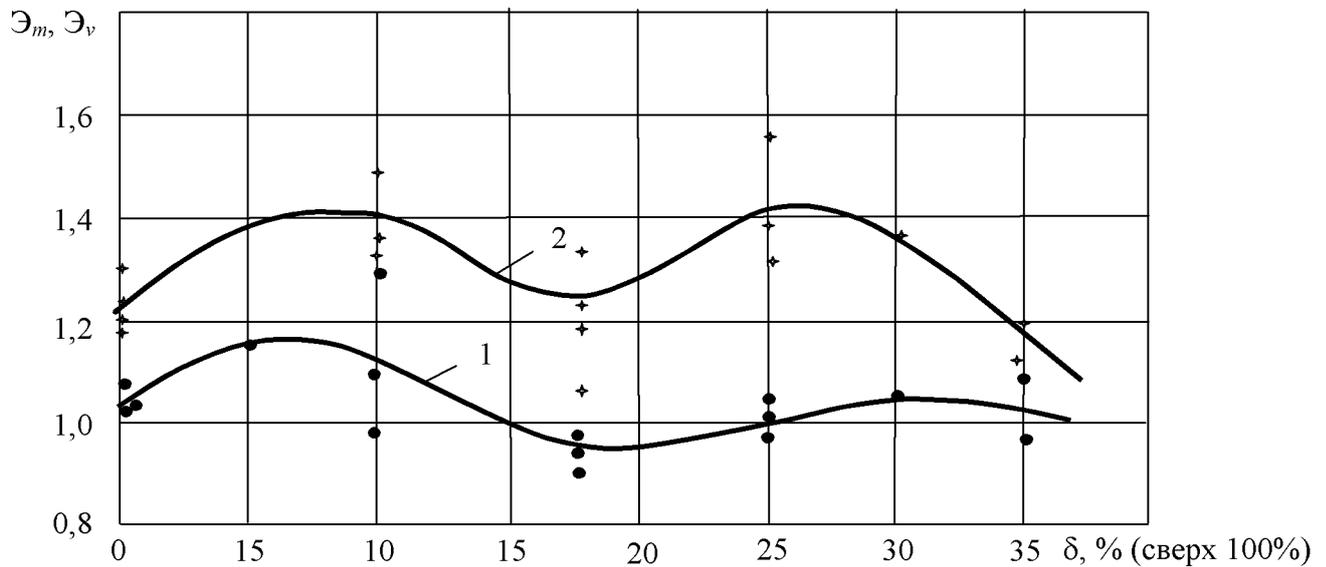


Рис. 2. Зависимость относительной удельной эффективности дробления (1) и выброса (2) при взрыве полимикса ГР1/8 от содержания в нем КЖУ марки К2

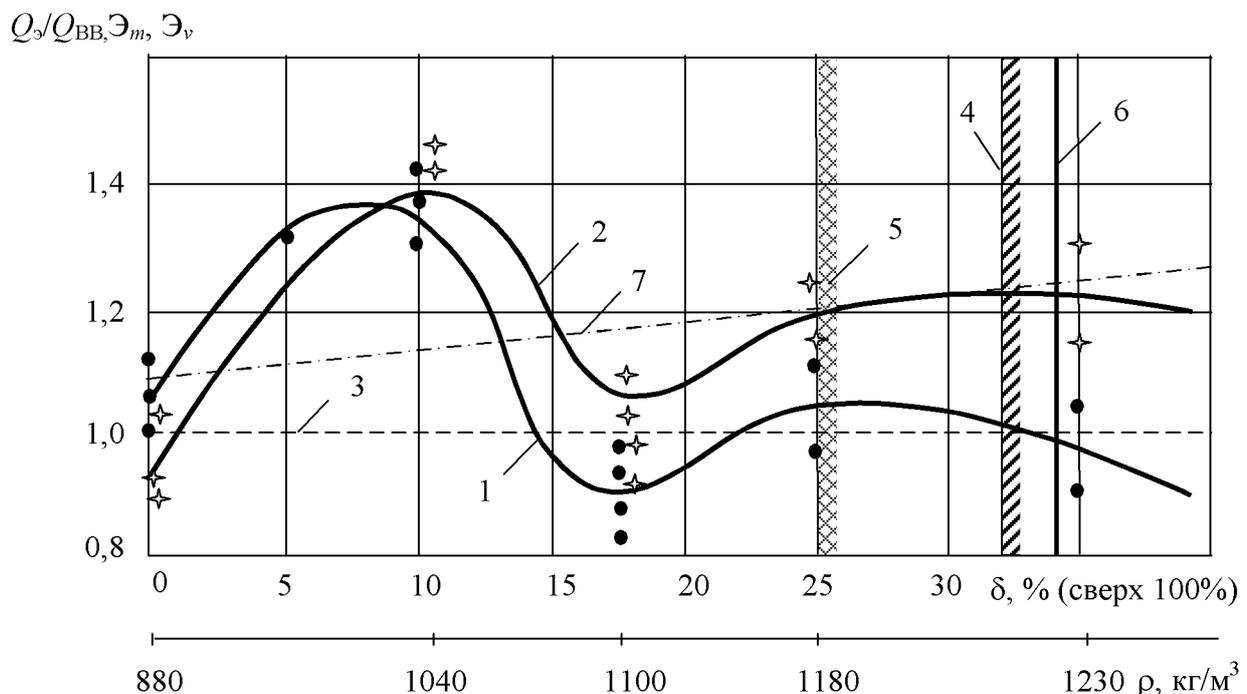


Рис. 3. Показатели относительной эффективности полимикса ГР1/8 при выполнении механических форм работы в зависимости от содержания КЖУ К2

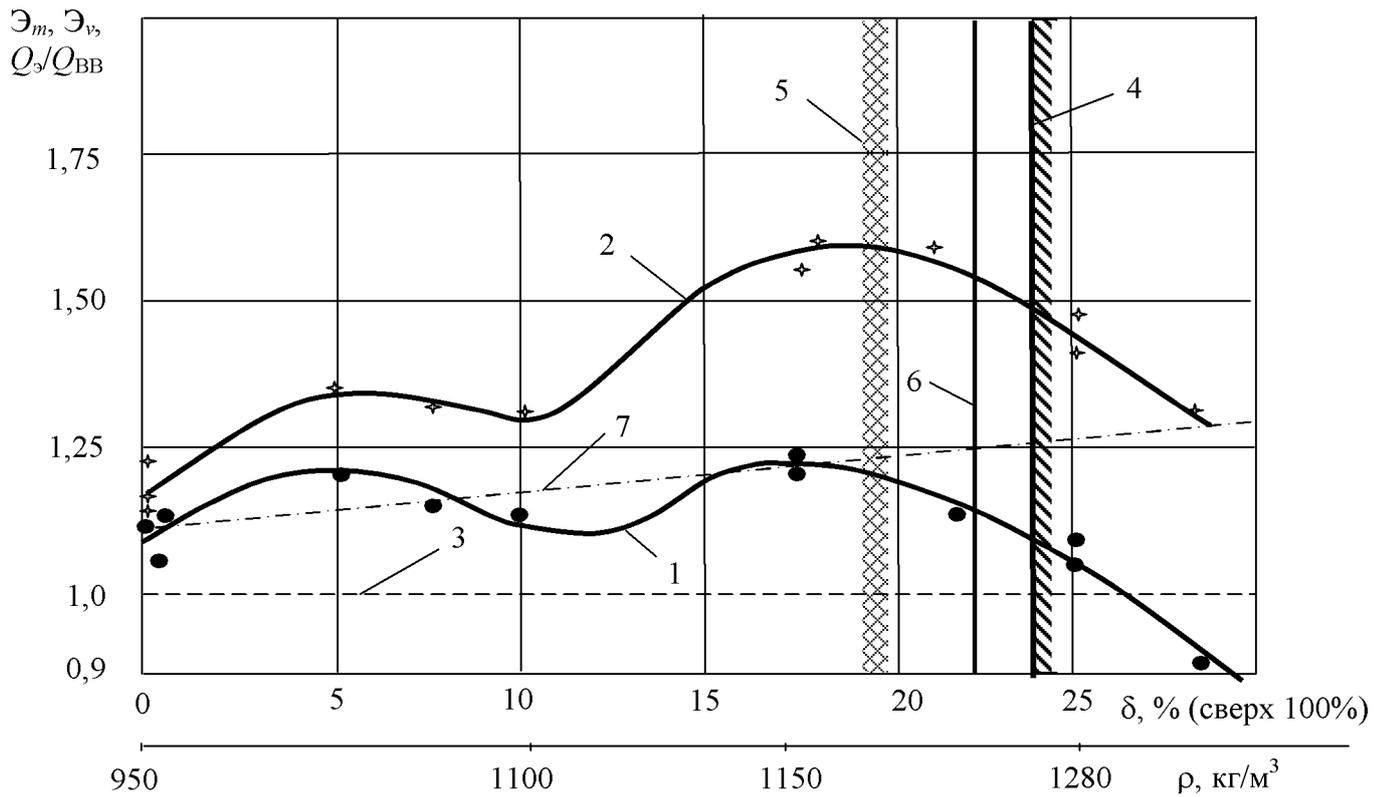


Рис. 4. Показатели относительной эффективности полимiksa ГР4-Т10 с 10% пористой селитры при выполнении механических форм работы в зависимости от содержания КЖУ К2

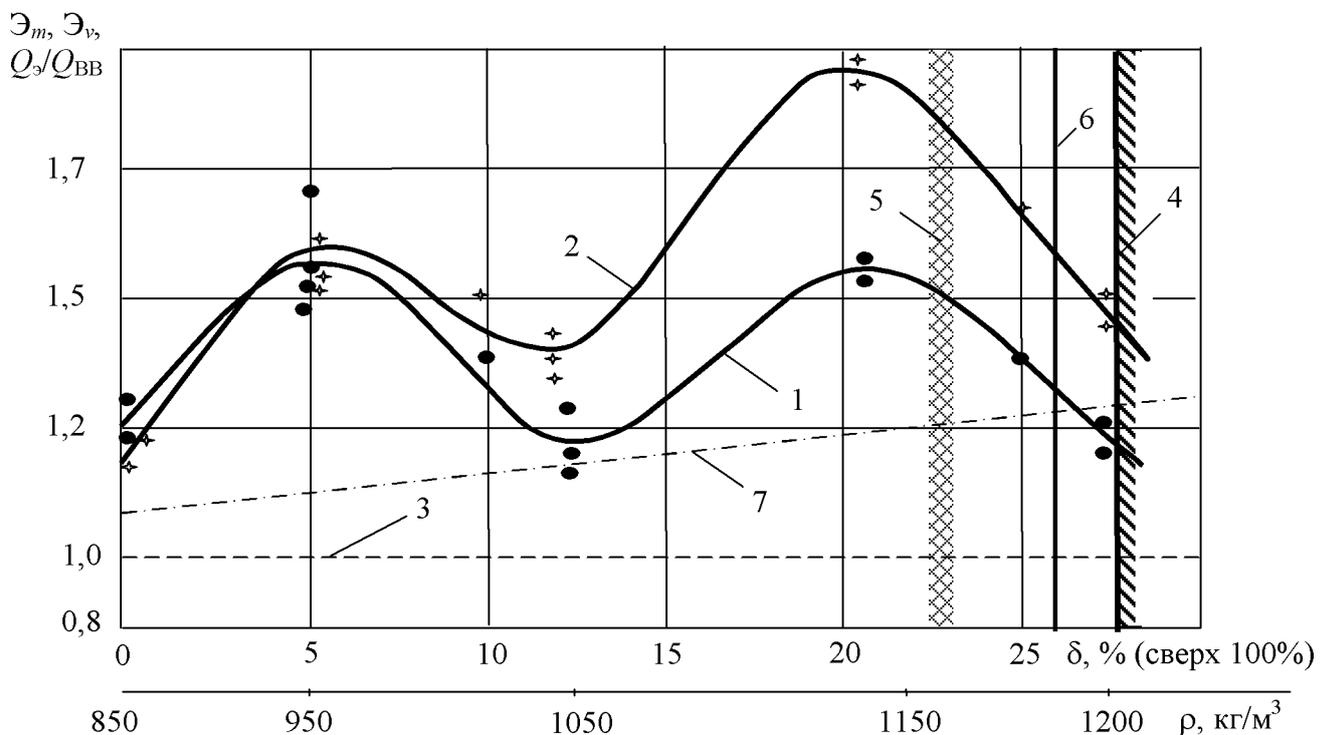


Рис. 5. Показатели относительной эффективности полимiksa ГР4-Т10 с 25% пористой селитры при выполнении механических форм работы в зависимости от содержания КЖУ К2

Из этих зависимостей следует, что удельная и объемная эффективность при увеличении содержания КЖУ изменяется по сложным зависимостям, с

двумя максимальными значениями и спадом эффективности между ними. Учитывая монотонное возрастание расчетных значений функции  $Q_v/Q_{ВВ}$ , можно утверждать, что подобные колебания, вероятно, связаны прежде всего с детонационной способностью смесей, обусловленной их физическим состоянием. Первоначальный значительный, на 8...10%, прирост плотности смеси, обусловленный переупаковкой твердых частиц и частичным заполнением пустот раствором приводит к росту скорости детонации и, соответственно, давлению, а также полноты выделения потенциального запаса тепла. Увеличение количества КЖУ приводит к обволакиванию ею твердых частиц, снижению сил трения между ними в процессе динамического сжатия в детонационной волне и, как следствие, флегматизации всех процессов химического превращения. Этими явлениями, вероятно, формируется первый максимум и спад эффективности на приведенных зависимостях. По мере увеличения содержания КЖУ в смеси формируется сплошная жидкая фаза с оставшимися незаполненными межгранульными пустотами. В этом случае происходит изменение механизма детонационного процесса. В сухих ВВ и при малом содержании КЖУ возбуждение химической реакции начинается в процессе сжатия в «горячих» точках на поверхности частиц с последующим послойным взрывным горением этих частиц [7]. При наличии сплошной жидкой среды процесс химической реакции осуществляется в результате адиабатического сжатия и разогрева воздушных включений, образованных в результате неполного заполнения межгранульного пространства, а также пористой селитры и других компонентов смеси. Такой механизм возбуждения реакции обуславливает наличие второго максимума показателей эффективности смеси, при котором оптимально сочетается количество «горячих» точек-пор и воздушных включений, плотность смеси и ее химический состав. Снижение пористости смеси при увеличении содержания КЖУ до значения, превышающего второе оптимальное значение, обуславливает снижение ее детонационных свойств и, как следствие, уменьшение эффективности взрывного воздействия на породы. Несмотря на то, что значения фугасной теплоты указанных полимиксов меньше значений этой теплоты для граммонита 79/21 и, как следует из зависимостей, приведенных на рис. 3, 4 и 5 (кривая 7), закономерно снижаются по мере роста содержания КЖУ, относительная удельная их эффективность и относительный коэффициент использования энергии взрыва на механические формы работы в основном больше единицы, а вторые их максимальные значения для тротилсодержащих полимиксов практически равны первым. Это можно объяснить отчасти улучшением детонационного процесса за счет наличия в составе указанных комплексов пористой аммиачной селитры, естественным повышением плотности смесей (рис. 6) и, как следствие, возрастанием скорости их детонации (рис. 7) и давления в детонационной волне. Кроме того, при этом отмечается некоторое увеличение объема выделяемых газов. Так, при содержании КЖУ в составе полимикса ГР4–Т10 с 25% пористой селитры 0, 6 и 20% давления соответственно равны 0,936 ГПа; 0,989 и 1,109 ГПа, а количество газов – 908, 912 и 917 л/кг.

Кривые 1...4 на рис. 6 имеют аналитический вид:

$$\rho_1 = -0,3\delta^2 + 20,2\delta + 973;$$

$$\rho_2 = -0,2\delta^2 + 16,9\delta + 940;$$

$$\rho_3 = -0,2\delta^2 + 18,1\delta + 870;$$

$$\rho_4 = -0,3\delta^2 + 18,3\delta + 856.$$

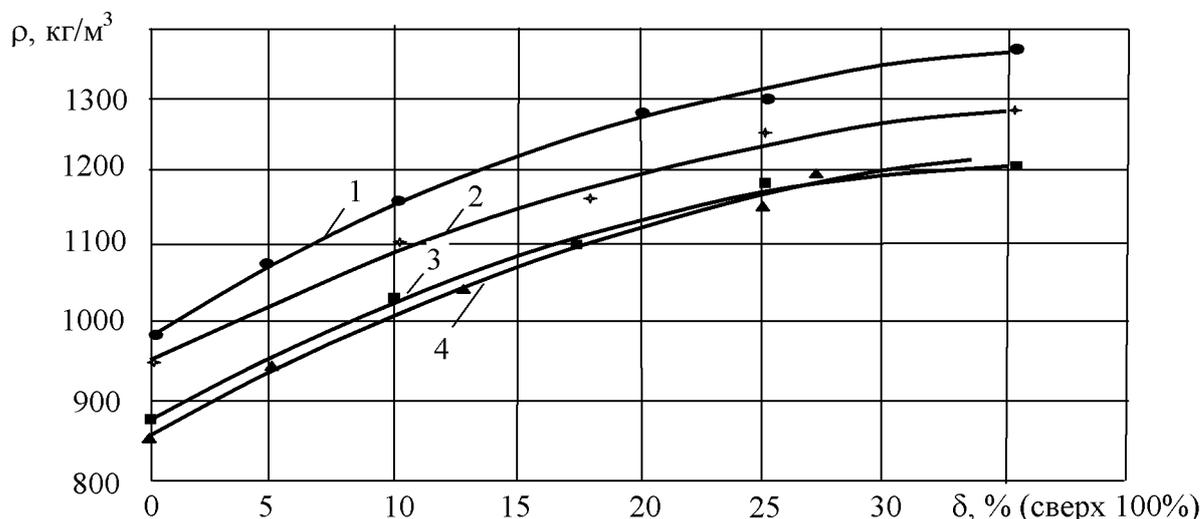


Рис. 6. Зависимость плотности смесей от содержания  $\delta$  КЖУ К2: 1 – полимикс ГР5–Т18; 2 – полимикс ГР4–Т10 (10% пористой аммиачной селитры); 3 – полимикс ГР1/8; 4 – полимикс ГР4–Т10 (25% пористой аммиачной селитры)

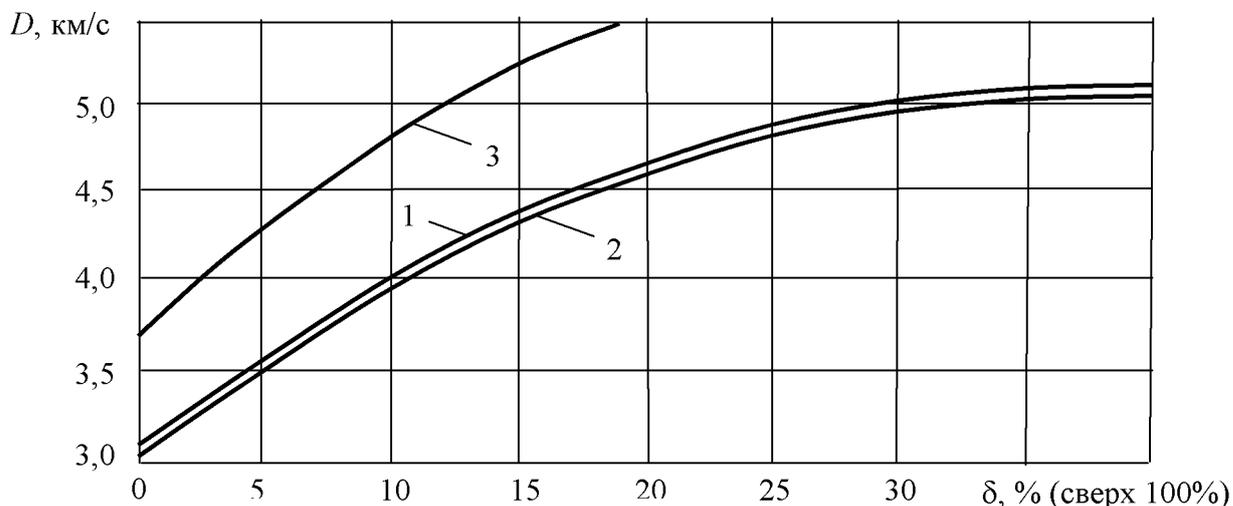


Рис. 7. Расчетные значения скорости детонации полимиксов в зависимости от содержания  $\delta$  КЖУ марки К2: 1 – полимикс ГР1/8; 2 – полимикс ГР4–Т10; 3 – полимикс ГР5–Т18

Снижение удельной эффективности при втором оптимальном значении содержания КЖУ относительно эффективности смеси при первом оптимальном значении для полимикса ГР1/8 в сравнении с тротилсодержащими полимиксами можно объяснить более резким спадом удельного энерговыделения и меньшим приращением объема выделяемых при этом газов.

Объемная эффективность заряда по мере его заполнения КЖУ и роста плотности также изменяется по закону, характерному для удельной эффективности заряда, с двумя максимальными значениями и спадом между ними.

Аналогично изменяется при этом и относительный коэффициент использования энергии взрыва на механические формы работы, который определяется произведением значений кривых 1 и 7 на рис. 2, 3 и 4.

Экспериментальные исследования эффективности тротилсодержащего полимикса ГР4–Т10 в зависимости от количества пористой селитры в его составе указывают на интенсивное изменение плотности смесей и показателей эффективности при использовании до 30...35% пористой селитры. Основные результаты этих исследований отражены в виде зависимостей, приведенных на рис. 8 и 9. Из них следует, что для наиболее эффективной реализации энергетического потенциала указанной взрывчатой смеси необходимо в их составе применение не менее 25% пористой аммиачной селитры.

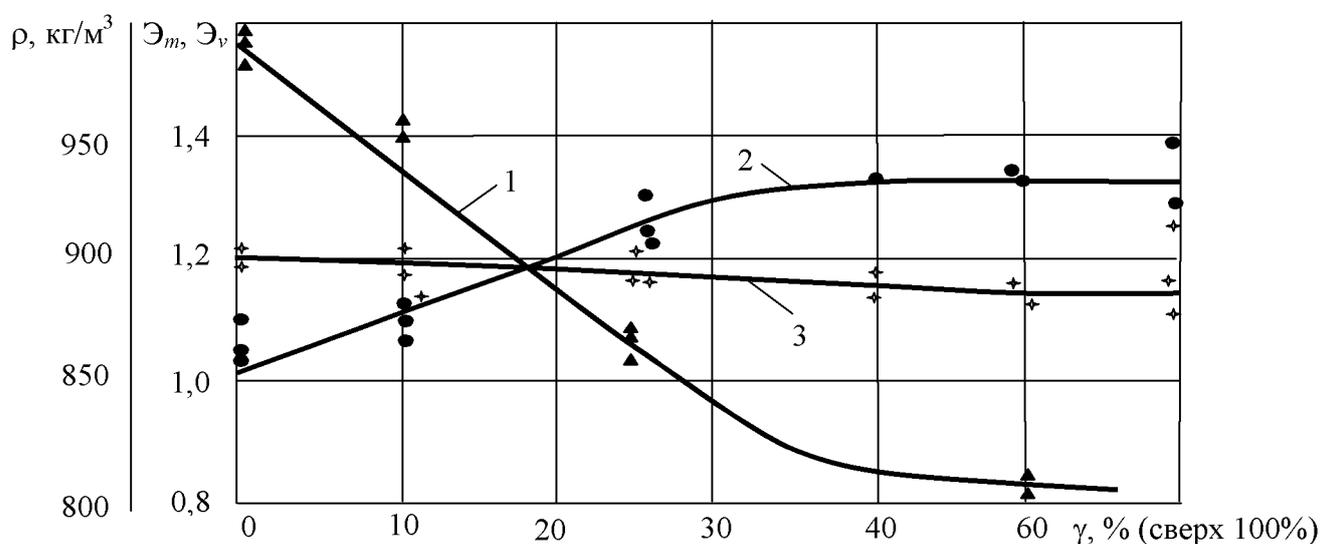


Рис. 8. Зависимость плотности (1), показателей относительной удельной эффективности  $\mathcal{E}_m$  (2) и объемной эффективности  $\mathcal{E}_v$  (3) полимикса ГР4–Т10 от содержания  $\gamma$  пористой селитры

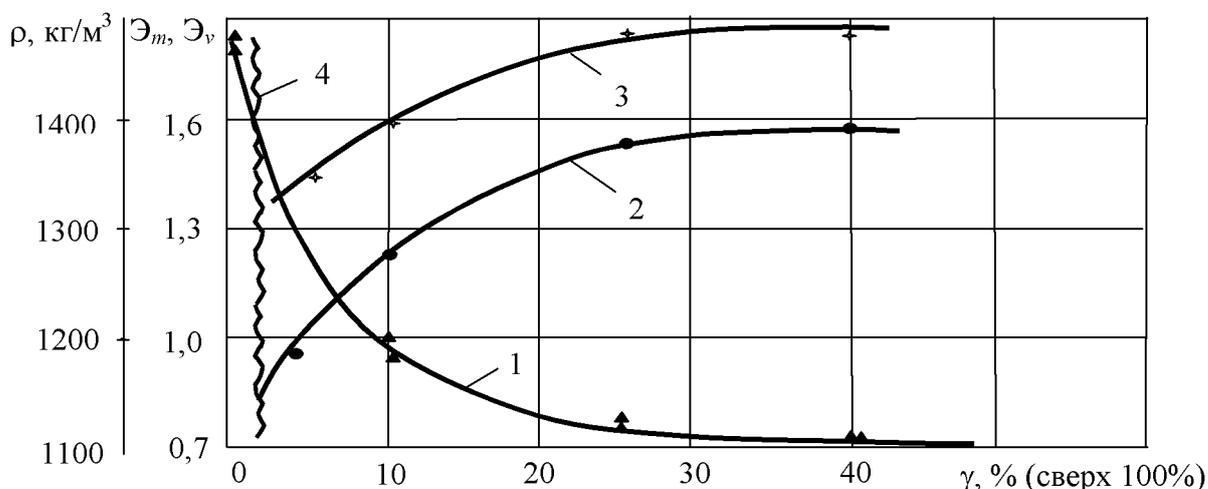


Рис. 9. Изменение плотности (1) показателей относительной удельной (2) и объемной (3) эффективности полимикса ГР4–Т10 с 20% КЖУ К2 от содержания  $\gamma$  пористой селитры; 4 – граница устойчивой детонации смеси в открытом заряде диаметром 0,19 м

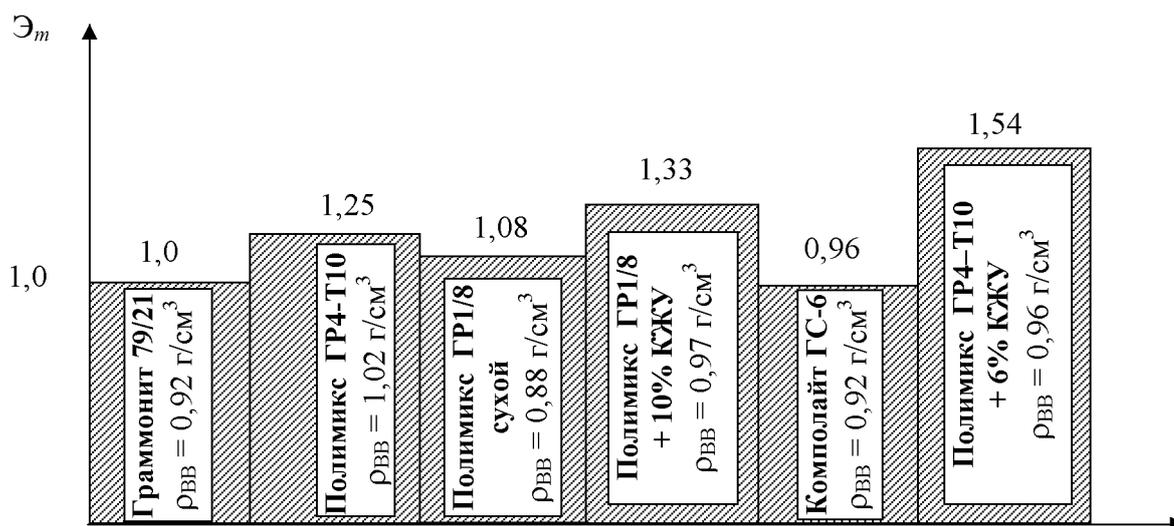


Рис. 10. Сравнительная удельная эффективность  $\mathcal{E}_m$  воронкообразования при взрывах различных ВВ в неводонаполненных скважинах

Результаты статистической оценки относительной удельной эффективности могут быть использованы в качестве характеристик различных марок ВВ при их сравнении. Это удобно осуществлять с использованием соответствующих диаграмм. Из диаграммы, приведенной на рис. 10, следует, что более эффективными при ведении взрывных работ, связанных с разрушением и перемещением пород, что характерно при подготовке пород к экскавации на карьере, являются ВВ с добавлением КЖУ.

1. Прокопенко В. С. Физико-технические основы разрушения скальных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах: Дис... докт. техн. наук. – Национальный НИИ охраны труда. – К., 2003. – 376 с.

2. Прокопенко В. С., Лотоус К. В. Влияние жидких добавок холодного приготовления на свойства промышленных взрывчатых веществ // Вісник Національного технічного університету України „КПІ”. Серія „Гірництво”. – Зб. наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2004. – Вип. 10. – С. 54–59.

3. Покровский Г. И. Пути повышения коэффициента использования энергии взрывчатых веществ при взрывах на выброс // Горн. журнал. – 1952. – № 11. – С. 18.

4. Мосинец В. Н. Энергетические и корреляционные связи процесса разрушения пород взрывом. – Фрунзе: Изд-во АН Киргиз. ССР, 1963. – 233 с.

5. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 276 с.

6. Мосинец В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 248 с.

7. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Недра, 1982. – 327 с.