

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАБОЙКИ НА ВРЕМЯ ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ

В. Г. Кравец, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»), А. М. Масюкевич, канд. физ.-мат. наук (НННІОТ), А. Л. Ган, магистр (НТУУ «КПИ»), А. В. Мизюк, инж. (НННІОТ)

Розглянуто процес вибухового руйнування набивки у вигляді капсули з криволінійною поверхнею, в яку засипаються сипучі матеріали. Час, необхідний для руйнування цієї набивки, визначається її геометрією і властивостями матеріалу. Набивка такої конструкції дозволяє подовжити час перебування продуктів детонації у свердловині (шпурі), що збільшує частку енергії вибуху, яка витрачається на корисну роботу.

Эффективность взрывных работ определяется качеством дробления породы и затратами на взрывные работы. Повышению эффективности взрывных работ посвящено огромное количество исследований [1–25, 27]. Это различные способы заряжания скважины, инициирования взрыва, схемы коммутации массовых взрывов, создание экологически чистых взрывчатых веществ (ВВ), средства и способы локализации пылегазовых выбросов в рабочей зоне карьера. Одним из способов повышения эффективности взрыва является применение забойки. Исследования влияния конструкции и компонентного состава забойки на энергетические параметры взрыва и параметры отбойки были начаты еще в 50-х гг. XX столетия [1–25]. Такое количество работ (в основном экспериментальных) обусловлено тем, что взрывные работы осуществляются с различной целью (рыхление породы, образование полостей и профильных выемок и т.п.) и в разнообразных по структуре и физико-механическим свойствам породах. Следует отметить, что в последнее время появились и теоретические исследования влияния забойки на эффективность взрыва [16, 18, 20–24].

До настоящего времени рассматривались забойки, которые отделялись от скважинного или шпурового заряда горизонтальной поверхностью. В настоящей работе изучается действие продуктов детонации (ПД) на забойку с криволинейной поверхностью и исследуются ее запирающие свойства. Конструкция такой забойки следующая: на заряд ВВ помещается пластмассовая капсула, имеющая волнообразную или криволинейную (рис. 1) поверхность. В капсулу засыпается сыпучий материал. Толщина стенок капсулы $\Delta h \approx 3 \dots 5$ мм.

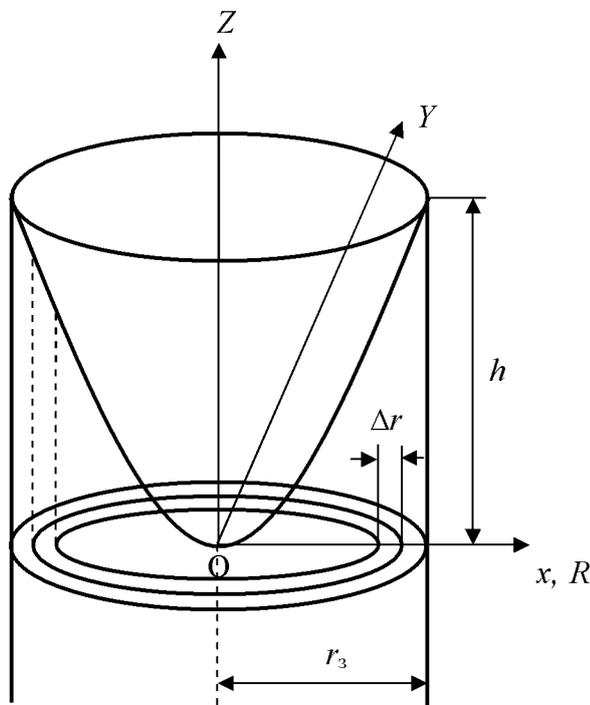


Рис. 1. Схема разделения заряда на элементарные объемы

Поверхность капсулы представляет собой эллиптический параболоид (см. рис. 1), в общем виде описываемый уравнением

$$Z = h \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right), \quad (1)$$

где h – высота забойки, м; x , y и a , b – соответственно текущие координаты и полуоси эллипса. Начало системы координат помещаем в точке соприкосновения капсулы забойки с центром поверхности заряда радиусом r_3 на его верхней части, то есть длина заряда в этой системе координат имеет отрицательное значение ($-l_3$).

С учетом цилиндрической симметрии заряда и забойки ($a = b = r_3$) поверхность капсулы описывается уравнением

$$Z = hr^2 / r_3^2, \quad (2)$$

где r – текущая координата.

Таким образом, между капсулой и зарядом имеется воздушный зазор переменной высоты, за исключением точки O , в которой капсула соприкасается с зарядом (см. рис. 1).

Скорость инициирования ВВ V_1 всегда больше скорости его детонации D , и фронт детонационной волны (ДВ) OC (рис. 2) в скважине не будет перпендикулярным относительно оси заряда. За время t , пока ДВ от точки B дойдет до точки $C(t = r_3/D)$, инициирование ВВ осуществится на расстоянии $BO = V_1 t = V_1 r_3 / D$ и, наконец, дойдет до точки O . Фронт ДВ распространяется по направлению вектора нормали \vec{n} к нему. В каждый последующий момент времени, когда ДВ выходит на границу заряда OD , поток ПД уходит перпендикулярно к поверхности заряда в направлении капсулы. Под действием

газообразных ПД, достигнувших забойки, последняя начнет перемещаться и разрушаться. На основании законов сохранения энергии и массы получим

$$\frac{MV^2}{2} + E_{\text{ВПД}} + E_{\text{КПД}} + E_{\text{разр}} = mQ; \quad \rho_{\text{ВВ}} = \rho_{\text{ПД}}, \quad (3)$$

где M – масса забойки, кг; V – скорость ее перемещения, м/с; $E_{\text{ВПД}}$ и $E_{\text{КПД}}$ – внутренняя и кинетическая энергия ПД, Дж; $E_{\text{разр}}$ – энергия разрушения капсулы, Дж; $\rho_{\text{ВВ}}$ и $\rho_{\text{ПД}}$ – плотность ВВ и ПД, кг/м³; m – масса ВВ, кг; Q – удельная теплота взрыва, Дж/кг.

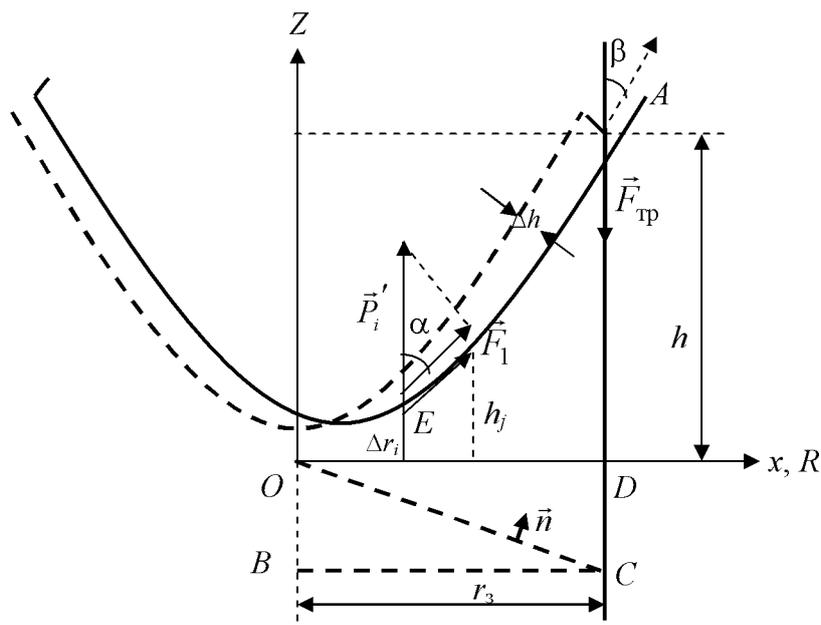


Рис. 2. Распределение сил в капсуле при взрыве

Подойдя к поверхности капсулы, ПД, в силу кривизны ее поверхности, устремляются по касательной, например, в точке E , в направлении точки A . Это приводит к повышенной концентрации ПД в пространстве возле точек соприкосновения капсулы и стенки скважины. В этих точках давление ПД на капсулу будет значительно больше, чем у ее вершины в точке O .

Когда ударная волна (УВ) ПД достигает капсулы (например, в точке K), в теле капсулы в точке O возникает сила \vec{F}_1 (см. рис. 2), параллельная касательной ее поверхности в этой точке и направленная в сторону стенки скважины.

Аналогичная ситуация будет наблюдаться в каждой точке капсулы. Поскольку наиболее вероятным результатом этого будет разрушение капсулы и всей забойки, первый член в уравнении (3) можно не учитывать. Тогда энергия разрушения определится по формуле

$$E_{\text{разр}} = \frac{PV_3}{k-1} - E_{\text{ВПД}} - E_{\text{КПД}}, \quad (4)$$

где P – среднее давление ПД в объеме заряда ($P = \rho_{\text{ВВ}} D/8$), Па; V_3 – объем заряда; k – показатель изэнтропы; $mQ = PV_3/(k-1)$ [12].

Чтобы определить $E_{\text{ВПД}}$ и $E_{\text{КПД}}$, заряд и зазор между зарядом и забойкой разобьем на элементарные цилиндрические объемы ΔV_i , для определения которых радиус заряда разделим на n равных частей Δr_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Длина образующей будет равна $l_3 + h_j$ (h_j – среднее расстояние от поверхности заряда в точке $\Delta r_i/2$ до поверхности капсулы), а величину h_j определим из формулы

$$h_j = (h_i - h_{i-1})/2. \quad (5)$$

Тогда внутренняя энергия $E_{\text{ЗВН}}$ ПД в элементарном объеме ΔV_{zi} , длина образующей которого равна длине заряда l_3 , будет равна

$$E_{\text{ЗВН}} = \frac{P_i \Delta V_{zi}}{k-1} = \frac{P_i}{k-1} \int_0^{\Delta r} r dr \int_{-l_3}^0 dz \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi \frac{P_i}{k-1} \frac{l_3}{r_3^2} \int_0^{\Delta r} r dr = \frac{\pi P_i}{k-1} l_3 \Delta r^2 = \frac{\pi P_i l_3}{k-1} \frac{r_3^2}{n^2} = \frac{P_i}{k-1} \frac{V_3}{n^2}. \quad (6)$$

Теплота взрыва массы Δm_i заряда ВВ в объеме ΔV_{zi} равна $\Delta m_i Q$. Из равенства этой теплоты Δm_i внутренней энергии $E_{\text{ЗВН}}$ можно определить давление ПД в объеме V_i :

$$P_i = \frac{(k-1)n^2}{\pi l_3 r_3^2} \Delta m_i Q = \frac{(k-1)n^2}{V_3} \Delta m_i Q, \quad (7)$$

где Δm_i – n -я часть массы ВВ, которая содержится в объеме ΔV_{zi} .

Формулой (7) определено давление ПД от взрыва заряда массой Δm_i в элементарном объеме ΔV_{zi} . Давление ПД P'_i в объеме ΔV_i отличается от давления P_i в объеме ΔV_{zi} из-за наличия зазора. Внутренняя энергия $E_{\text{ВПД}}$ определяется формулой

$$\begin{aligned} E_{\text{ВПД}} &= \frac{P'_i}{k-1} \left[\Delta V_{zi} + \int_0^{\Delta r} r dr \int_0^{h_j} dz \int_0^{2\pi} d\theta \right] = \frac{P'_i}{k-1} \left[\Delta V_{zi} + \pi h_j \Delta r^2 \right] = \\ &= \frac{P'_i}{k-1} \left[\pi l_3 \frac{r_3^2}{n^2} + \pi h_j \frac{r_3^2}{n^2} \right] = \frac{P'_i}{k-1} \pi (l_3 + h_j) \frac{r_3^2}{n^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где P'_i – давление ПД в объеме ΔV_i , которое можно определить из уравнения состояния

$$P_i \Delta V_{zi}^3 = P'_i \Delta V_i^3; \quad P'_i = P_i \left(\frac{l_3}{l_3 + h_j} \right)^3. \quad (9)$$

Кинетическая энергия ПД в элементарном объеме

$$E_{\text{КПД}} = \frac{\Delta m_i U^2}{2} = \frac{\rho_{\text{ВВ}} U^2}{2} \int_0^{\Delta r} r dr \int_0^{h_j} dz \int_0^{2\pi} d\theta = \frac{\rho_{\text{ВВ}} U^2}{2} \pi h_j \frac{r_3^2}{n^2} = \frac{\pi}{2} \rho_{\text{ВВ}} U^2 h_j \frac{r_3^2}{n^2}, \quad (10)$$

где U – скорость движения ударной волны, м/с.

Таким образом, энергия разрушения, обусловленная действием ПД в элементарном объеме ΔV_i , запишется как

$$E_{\text{разр.}i} = \frac{P_i}{k-1} \frac{V_3}{n^2} - \frac{P_i'}{k-1} \pi (l_3 + h_j) \frac{r_3^2}{n^2} - \frac{\pi}{2} \rho_{\text{ВВ}} U^2 h_j \frac{r_3^2}{n^2}. \quad (11)$$

Давление УВ на капсулу в каждой точке ее поверхности равно P_i' и направлено по оси Z , а упомянутая выше сила \vec{F}_1 , которую следует теперь обозначить \vec{F}_{1i} , равна

$$\vec{F}_{1i} = \vec{P}_i \cos \alpha, \quad (12)$$

где α – угол между \vec{P}_i и касательной к поверхности капсулы, град.

Например, в точке O , координаты которой по оси R равны $R_{i-1} = (i-1)\Delta r$, а по оси Z равны $Z_{i-1} = h_{i-1} (i-1)^2 \Delta r^2 / r_3^2$, уравнение касательной имеет вид

$$2h_{i-1} \frac{r}{r_3^2} [r - (i-1)\Delta r] + \frac{1}{r_3^2} [hr^2 - h_{i-1} (i-1)^2 \Delta r^2] = 0 \quad (13)$$

или

$$2h_{i-1} \frac{r}{r_3^2} \left[r - (i-1) \frac{r_3}{n} \right] + \frac{1}{r_3^2} \left[hr^2 - h_{i-1} (i-1)^2 \frac{r_3^2}{n} \right] = 0,$$

где r – текущая координата по оси R .

Угол α между вектором \vec{P}_i' и вектором касательной к поверхности капсулы $\delta \vec{r}$, который можно определить с помощью уравнения (13), равен

$$\cos \alpha = \frac{\vec{P}_i' \delta \vec{r}_i}{\sqrt{(P_i')^2 (\delta r)^2}}. \quad (14)$$

Как отмечено выше, часть ПД устремится к верхней части капсулы в направлении касательной в каждой точке $\delta \vec{r}_i$, создавая вдоль ее поверхности неравномерное распределение плотности этих ПД (максимальная плотность будет в точке A , а минимальная – в точке O). Функцией распределения частиц (молекул) ПД является распределение Максвелла–Больцмана, поскольку эта функция описывает распределение частиц в произвольном силовом поле, которое в данном случае определяется силами, приводящими к «скольжению» ПД вдоль поверхности капсулы и их неравномерному распределению.

Среднее число частиц ПД в каждой точке поверхности

$$\bar{n}_i = 1 / \left[\exp \left(- \frac{E_{\text{ПД}i}}{kT} \right) \right], \quad (15)$$

где \bar{n}_i – среднее число частиц в каждой точке поверхности; $E_{\text{ПД}}$ – их полная энергия в этих точках, Дж; k – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Полная энергия

$$E_{\text{ПД}} = \pi \frac{P'_i}{k-1} (l_3 + h_j) \frac{r_3^2}{n^2} + \frac{\pi}{2} \rho_{\text{ВВ}} U^2 h_j \frac{r_3^2}{n^2} . \quad (16)$$

Подставляя в формулу (15) полную энергию (16) и температуру взрыва, характерную для данного ВВ, получим среднее число частиц (молекул) в i -м элементарном объеме ΔV_i . Зная молекулярную массу m_m частиц ПД, можно определить массу Δm_i и плотность частиц, сосредоточенных в каждом ΔV_i :

$$\Delta m_i = m_m \bar{n}_i; \quad \rho_i = \Delta m_i / \Delta V_i, \quad (17)$$

где ρ_i – плотность ПД в ΔV_i с учетом неравномерности их распределения, кг/м³.

Новое давление P''_i ПД, оказываемое на каждый элемент поверхности капсулы, можно определить по известной формуле

$$P''_i = \frac{\rho_i D^2}{8} . \quad (18)$$

Следует отметить, что давление P''_i отличается от P'_i тем, что последнее обусловлено действием равномерно распределенных газообразных ПД в объеме ΔV_i , а P''_i учитывает их давление на капсулу в условиях неодинаковой плотности ПД в зазоре.

Процесс разрушения твердого тела – это процесс зарождения и раскрытия трещин. В физике твердого тела понятие поверхностной энергии связано с энергетическим состоянием атомного слоя вещества, выходящего на свободную поверхность тела. А. Гриффитс положил поверхностную энергию γ (Дж/м²) как меру энергетических затрат при разрушении тел. При этом модель строится на энергетическом балансе, реализуемом в теле, которое содержит трещину в поле растягивающих напряжений σ_p . При наличии трещины длиной L потенциальная энергия тела $U_{\text{П}}$ уменьшается на величину ΔU в сравнении с тем же телом без трещины [26, 27]:

$$\Delta U = -\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L^2, \quad (19)$$

где E – модуль Юнга; ΔU – упругая энергия тела с трещиной, Дж.

Тело с трещиной, в отличие от тела без нее, обладает дополнительной энергией поверхностного натяжения γ на двух свободных поверхностях трещины [26, 27]

$$U_{\text{П}} = 12\gamma L . \quad (20)$$

Общее уравнение энергии тела с трещиной

$$\Delta W = \Delta U + U_{\text{п}} = -\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L^2 + 12\gamma L. \quad (21)$$

Такое изменение энергии справедливо для тела, содержащего одну трещину. В процессе взрыва на разрушение капсулы затрачивается работа, которая равна общей энергии разрушения. В результате этого в теле капсулы возникнет N трещин, число которых определяется уравнением

$$N\Delta W = N \left(-\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L^2 + 12\gamma L \right) = E_{\text{разр}}, \quad (22)$$

где $E_{\text{разр}}$ – общая энергия разрушения капсулы, равная

$$E_{\text{разр}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{разр},i} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{P_i}{k-1} \frac{V_3}{n^2} - \frac{P'_i}{k-1} \pi (l_3 + h_j) \frac{r_3^2}{n^2} - \frac{\pi}{2} \rho_{\text{ВВ}} U^2 h_j \frac{r_3^2}{n^2} \right]. \quad (23)$$

В формуле (23) необходимо учесть, что h_j определяется по формуле (5).

Скорость раскрытия трещин $V_{\text{тр}}$ соответствует изменению энергии разрушения во времени:

$$\frac{dE_{\text{разр}}}{dt} = N \left(-\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L + 12\gamma \right) = N \left(-\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L + 12\gamma \right) V_{\text{тр}}, \quad (24)$$

где

$$\frac{dE_{\text{разр}}}{dt} = -\pi \frac{r_3^2}{n^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P'_i}{k-1} + \frac{\rho_{\text{ВВ}} U^2}{2} \right) \frac{dh_j}{dt}. \quad (25)$$

Знак минус в формуле (25) показывает, что происходит уменьшение энергии за счет затрат на зарождение и развитие трещин. Таким образом, скорость разрушения капсулы равна

$$V_{\text{тр}} = \pi \frac{r_3^2}{n^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P'_i}{k-1} + \frac{\rho_{\text{ВВ}} U^2}{2} \right) \frac{dh_j}{dt} / N \left(\frac{\sigma_p^2}{4E} \pi L - 12\gamma \right), \quad (26)$$

а время ее разрушения

$$t_1 = \Delta h / V_{\text{тр}}. \quad (27)$$

После разрушения капсулы начинаются процессы фильтрации ПД через зернистую забойку и происходит ее выброс [16–18, 25]. Время задержки вылета ПД t_1 увеличивается, по сравнению с другими видами забойки, на время разрушения капсулы в скважине.

Скорость разрушения капсулы (26) содержит множитель dh_j/dt , который можно представить в виде $d(Ut_j)/dt \approx U$, где t_j – время прохождения h_j ударной волной со скоростью U , присущей данному ВВ, и $V_{\text{тр}}$ можно записать как

$$V_{\text{тр}} = \pi \frac{r_3^2}{n^2} \frac{U}{N} \frac{1}{k-1} \frac{\sum_{i=1}^n P'_i + n \frac{\rho_{\text{ВВ}} U^2}{2}}{\pi L \frac{\sigma_p^2}{2E} - 12\gamma}. \quad (28)$$

В качестве примера рассмотрим скважину радиусом $r_c = 125$ мм. Взрывчатое вещество – граммонит 79/21, $\rho_{\text{ВВ}} = 1,69$ г/см³, скорость детонации $D = 4000$ м/с, $U = 1550$ м/с, над ВВ помещена капсула с криволинейной поверхностью из ударопрочного полистирола УПМ-703 толщиной $\Delta h = 0,003$ м, $\sigma_p = 500 \dots 600$ кгс/см², $E = 1 \cdot 10^4$ кгс/см². Радиус скважины (заряда) разделим на 10 равных частей ($\Delta r = 0,1r_3$) и рассмотрим разрушение капсулы в средней части ($m = 5, k = 1,4$). После вычислений по формуле (28) получим, что скорость разрушения капсулы $V_{\text{тр}}$ без учета засыпки равна $6,55536 \cdot 10^4$ м/с, а время ее разрушения t составляет $4,576 \cdot 10^{-7}$ с.

Выводы

Рассмотрен процесс взрывного разрушения забойки оригинальной конструкции, определяемой ее геометрией и свойствами материала. Время пребывания ПД в скважине увеличивается на время, необходимое на разрушение такой забойки, что увеличивает долю энергии взрыва, затрачиваемую на полезную работу – дробление породы. Рассмотренная забойка позволяет увеличить объем дробления, следовательно, уменьшить количество скважин и затраты на взрывные работы.

После подачи данной работы в печать опубликована работа [28], в которой рассмотрен частный случай забойки с криволинейной поверхностью, а именно: сферической. Кроме того, в [28] давление от действия взрыва заряда определяется через потенциал волны, что при наличии турбулентности ПД и градиентности их давления не совсем корректно.

Публикуемая работа является частью научной работы, выполненной в ННИИОТ и приведенной в отчете в 2004 г.

1. Баум Ф. А., Сансарян Н. С. Импульсы взрыва, обусловленные боковым распором забойки в скважине // Взрывное дело. – М.: Недра, 1966. – № 59/16. – С. 28–32.

2. Миндели Э. О., Демчук П. А., Александров В. Е. Забойка шпуров. – М.: Недра, 1967. – 152 с.

3. *Исследование влияния материала забойки на скорость вылета и прорыва газообразных продуктов* / М. Ф. Друкованый, Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Семенюк, С. Т. Сурначева // *Механика и разрушение горных пород*. – М.: Недра. – 1969. – Вып. 1. – С. 121–128.

4. *Семенюк И. А., Оберемок О. Н. Взрывные работы на открытых горных разработках*. – Днепропетровск: Промінь, 1974. – 55 с.

5. *Комплексное исследование действия взрыва в горных породах* / Э. О. Миндели, Н. О. Кусов, А. А. Корнеев, Г. И. Марцинкевич. – М.: Недра, 1978. – 253 с.

6. *Исаков А. А., Коковкин В. П. Модельные исследования поведения забойки и расчет импульса при взрыве скважинных зарядов*. – ФТПРПИ. – 1979, № 4. – С. 29–38.

7. *А.с. 1251653 СССР, МКИ Е21С 37/00. Способ комбинированной забойки скважинного заряда ВВ* / В. М. Комир, В. В. Воробьев, Э. И. Ефремов и др. // Заявл. 6.12.84, № 3821500.

8. *Исследования эффективности комбинированной забойки* / Н. И. Мячина, В. Г. Назаренко, В. И. Нападало и др. // Деп. в ВИНТИ, 1.08.85, № 5755-85, Реф. № 10Б127.

9. *Гурин А. А., Яценко С. С. Применение гидрогелевой забойки взрывных скважин* // *Безопасность труда в промышленности*. – 1986, № 1. – С. 38–39.

10. *Ташкинов А. С., Бирюков А. В. Роль и эффективность забойки при взрыве скважинного заряда* // *Открытая разработка угольных месторождений*. – Кемерово: Кузбасский политехнический институт. – 1987. – С. 10–17.

11. *Разрушение горных пород энергией взрыва* / Э. И. Ефремов, В. С. Кравцов, Н. И. Мячина, В. Д. Петренко и др. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.

12. *Повышение эффективности действия взрыва в твердой среде* / В. М. Комир, В. М. Кузнецов, В. В. Воробьев, В. Н. Чебенко. – М.: Недра, 1988. – 209 с.

13. *Влияние конструкции забойки и запирающих зарядов на качество взрывной отбойки* / С. П. Акинфиев, А. И. Незговоров, И. С. Иванова, Г. П. Кобельков, В. В. Бренинский, Н. Г. Волченко // *Горный журнал*. – 1988. – № 4. – С. 35–37.

14. *Яковенко В. Г., Бекетаев Е. Б., Берг А. И. Применение забойки переменной плотности* // *Цветметинформация*. – 1990. – № 6. – С. 37–39.

15. *Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород* / Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский, В. П. Мартыненко. – К.: Техника. – 1990. – 149 с.

16. *Иценко К. С. Влияние конструкции шпурового заряда с использованием различных забоечных материалов, влияющих на процесс трещинообразования при взрыве* // *Повышение эффективности разрушения горных пород*. – К.: Наук. думка, 1991. – С. 59–61.

17. *Ефремов Э. И., Родак С. Н. Роль забойки скважинного заряда в запирании газообразных продуктов детонации* // *Повышение эффективности разрушения горных пород*. – К.: Наук. думка, 1991. – 140 с.

18. *Иценко К. С. Исследование конструкций шпуровых зарядов с использованием различных забоечных материалов, влияющих на процесс*

разрушения среды при взрыве // Техника и технология горного производства. – К.: Наук. думка. – 1993. – С. 23–28.

19. *Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах* / Э. И. Ефремов, П. В. Бересневич, В. Д. Петренко и др. – Днепропетровск: Січ, 1996. – 179 с.

20. *Петренко В. Д., Никифорова В. А., Коновал В. Н.* Теоретические оценки времени вылета забойки из мелко раздробленной породы при взрыве // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТХ НАН Украины. – 1997. – Вып. 3. – С. 86–89.

21. *Александрова Н. И., Шер Е. Н.* Влияние забойки на разрушение горных пород взрывом цилиндрического заряда // ФТПРПИ. – 1999. – № 5. – С. 42–52.

22. *Александрова Н. И., Шер Е. Н.* Влияние утечек газов из полости взрыва сферического заряда на разрушение горных пород // ФТПРПИ. – 2000. – № 5. – С. 43–53.

23. *Ефремов Э. И., Ищенко К. С., Никифорова В. А.* Исследование движения забойки в шпурах // Уголь Украины. – 2000. – № 6. – С. 20–22.

24. *Ефремов Э. И., Мартыненко В. П., Бережецкий А. Я.* Способ повышения эффективности взрыва и локализации пылегазовых выбросов // Вісник Кременчуцького ДПУ. – Кременчуг, 2000. – Вип. 2. – С. 3–5.

25. *Снижение техногенной нагрузки на окружающую среду при использовании простейших ВВ и специальной забойки* / Э. И. Ефремов, А. Я. Бережецкий, А. В. Пономарев, В. В. Баранник, В. П. Куприн // Екологія і природокористування. – Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 5. – С. 137–140.

26. *Кузнецов В. М.* Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. – 262 с.

27. *Воробьев В. Д., Масюкевич А. М., Косьмин И. В.* О радиусе воронки дробления в скальных породах при взрыве удлиненного заряда взрывчатого вещества // Вісник НТУУ «КПІ». Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2002. – Вип. 7. – С. 44–54.

28. *Бережецкий А. Я.* Эффективность применения капсулы с ингибитором в забойке скважинных зарядов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія „Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2002. – Вип. 7. – С. 114–120.