УДК 622:004.9

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И СТЕПЕНИ АЭРАЦИИ ПО ДЛИНЕ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ПРИМЕРЕ НИТРОНИТА Э-70

Синицын В.А., Меньшиков П.В., Шеменев В.Г.

ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, e-mail: menshikovpv@mail.ru

Установлено, что численное моделирование любого процесса основывается на математическом описании с учетом общих физических закономерностей и экспериментальных значений параметров, определяющих его начальные и граничные условия. При этом процессы детонации заряда и разрушения среды описываются определенными модельными приближениями. Такие допущения являются неизбежными ввиду сложности учета всего комплекса факторов, влияющих на поведение среды при взрывных нагрузках. Построена математическая модель определения плотности и степени аэрации по длине скважинного заряда эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) на примере нитронита Э-70. На основании разработанной математической модели построены номограммы для определения плотности и массы скважинного заряда ЭВВ по глубине скважины и различной исходной плотности. На основании построенной математической модели разработана методика определения плотности и массы заряда для любых ЭВВ при различной глубине скважин.

Ключевые слова: скважинный заряд, эмульсионные взрывчатые вещества, гидростатическое давление, глубина скважины, плотность, математическая модель, горная порода, степень аэрации, масса заряда

MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF DENSITY AND AERATION LENGTH HOLE CHARGES OF EMULSION EXPLOSIVES THE EXAMPLE NITRONIT E-70

Sinitsyn V.A., Menshikov P.V., Shemenev V.G.

Institute of Mining Engineering of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, e-mail: menshikovpv@mail.ru

It is found that the numerical simulations of any process is based on the mathematical description with the general physical laws and experimental values of the parameters that define its initial and boundary conditions. In this process the charge detonation and destruction of the environment are described certain model approximations. Such assumptions are inevitable given the complexity of the whole set of factors that influence the behavior of the environment with the explosive load. A mathematical model for determining the density and degree of aeration holes along the length of the -emulsion explosives charge the example of Nitronit E-70. On the basis of developed-term mathematical model constructed a nomograms for determining the density and mass of the explosive charge at a downhole depth of the hole and the different initial density. On the basis of the constructed mathematical model developed methods of measuring density and mass of the charge for any of emulsion explosives at different depths of the holes.

Keywords: downhole charge, emulsion explosives, the hydrostatic pressure, hole depth, density, mathematical model, rock, the degree of aeration, mass of the charge

В настоящее время широкое применение находят эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ), имеющие ряд существенных преимуществ перед другими типами промышленных ВВ. В составе ЭВВ отсутствуют взрывчатые компоненты, они водоустойчивы, дешевы, отличаются низкой чувствительностью к механическим воздействиям и позволяют осуществлять их механизированное изготовление и заряжание. Один из способов сенсибилизации смеси состоит во введении в нее раствора газогенерирующей добавки, содержание и концентрация которой регулируют конечную плотность ЭВВ. Однако газовые пузырьки, распределенные в эмульсии и выполняющие функцию «горячих точек», сжимаются под действием гидростатического давления колонки заряда, приводя к увеличению плотности ЭВВ по мере возрастания глубины скважины.

Вследствие ухудшения условий открытой разработки полезных ископаемых – увеличение крепости и обводненности пород с глубиной в карьерах, обеспечение необходимого качества дробления горных пород без существенного увеличения затрат возможно только за счет интенсификации буровзрывных работ (БВР), одним из основных направлений которой является оптимизация параметров скважинной отбойки. Имеющиеся на сегодняшний день расчетные методики для их определения обладают рядом недостатков и требуют

усовершенствования в части более полного учета особенностей взрывного процесса в среде. Следовательно, совершенствование методов определения параметров БВР является актуальной научной задачей и имеет большое практическое значение [7].

Рассмотрим пузырек газа в нитроните Э-70. Давление в пузырьке (рис. 1):

$$P_{п} = \frac{2\delta}{r} + P, \qquad (1)$$

где δ – коэффициент поверхностного натяжения; r – радиус пузырька; P – давление в окружающем пузырьке нитронита Э-70.

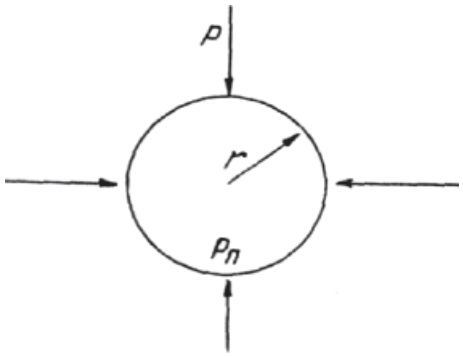

Рис. 1. Давление в пузырьке

Рассмотрим скважинный заряд нитронита Э-70 (рис. 2). Введем обозначения: $L_з$ – длина заряда нитронита Э-70; Po – давление на верхний торец заряда; $\rho_с$ – плотность эмульсии (не аэрированной); $\rho_о$ – плотность ВВ при заряжании; $P(x)$ – давление в заряде в сечении (на глубине x относительно верхнего торца заряда); $\rho(x)$ – плотность в заряде в сечении x.

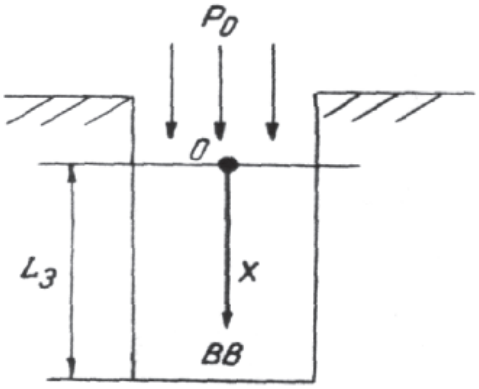

Рис. 2. Скважинный заряд нитронита Э-70

Эмульсия состоит из двух несмешивающихся жидкостей. Поэтому максимальную плотность можно рассчитать через удельные объемы, занимаемые каждой жидкостью в эмульсии [1, 2, 5].

Пусть $V_с = 1/\rho_с$ – удельный объем эмульсии; $V_г(x)$ – удельный объем газа в сечении x. Тогда

$$\rho(x) = (V_с + V_г(x))^{-1}, \qquad (2)$$

где $V_с$ = const.

Количество пузырьков N в любом сечении x постоянно ввиду большой вязкости нитронита Э-70 (нет распределения по x вследствие диффузного движения пузырька). Тогда

$$V_г(x) = \frac{4}{3}\pi V_x^3 N; \qquad (3)$$

$$V_{r0} = V_r(x=0) = \frac{4}{3}\pi r_0^3 N, \qquad (4)$$

где V_{r0} – удельный объем газовой фазы при заряжании; r_0 – начальный радиус пузырька при заряжании. Тогда из (3) и (4)

$$V_r(x) = V_{r0}\left(\frac{r_x}{r_с}\right)^3, \qquad (5)$$

где r_x – радиус пузырька в сечении x.

Подставляем (5) в (2):

$$\rho(x) = \left(V_c + V_{r0}\left(\frac{r_x}{r_с}\right)^3\right)^{-1}$$

или

$$\rho(x) = \left(1 + \frac{V_{r0}}{V_c}\left(\frac{r_x}{r_с}\right)^3\right)^{-1}. \qquad (6)$$

Здесь $\frac{V_{r0}}{V_c} = Z_0$, Z_0 – степень аэрации нитронита при заряжании. В других обозначениях $Z_0 = \frac{\rho_с - \rho_0}{\rho_0}$. Учитывая, что $1/V_с = \rho_с$, выражение (6) можно представить:

$$\rho(x) = \rho_с \Big/ \left(1 + Z_0\left(\frac{r_x}{r_с}\right)^3\right). \qquad (7)$$

Рассмотрим теперь элемент объема заряда на глубине x толщины Δx (рис. 3).

Из условия равновесия данного элемента следует:

$$S(P(x+\Delta x) - P(x)) = \rho(x) S g \Delta x_0, \qquad (8)$$

где S – площадь сечения заряда. Здесь учтено, что при достаточно малом Δx можно

считать плотность в данном элементе постоянной и равной $\rho(x)$. Тогда (8) имеет вид $\frac{P(x+\Delta x)-P(x)}{\Delta x}=g\rho(x)$. При $\Delta x \to 0$ получаем $\frac{dP(x)}{d(x)}=g\rho(x)$. Подставляя (7), имеем

$$\frac{dP(x)}{d(x)}=g\rho_0\Big/\left(1+Z_0\left(\frac{r_x}{r_c}\right)^3\right). \qquad (9)$$

Пусть теперь сжатие пузырьков происходит адиабатически (распределение $\rho(x)$ устанавливается в заряде до наступления существенного остывания нитронита). Тогда

$$P_{\text{п}.0}V_{\text{п}.0}^{\gamma}=P_{\text{п}.x}V_{\text{п}.x}^{\gamma}, \qquad (10)$$

где $P_{\text{п}.0}$ – давление в пузырьке при заряжании; $P_{\text{п}.x}$ – давление в пузырьке, расположенном в сечении x; $V_{\text{п}.0}$ – объем газа пузырька при заряжании; $V_{\text{п}.x}$ – объем газа пузырька, находящегося в сечении x; $\gamma = 1{,}25$ – показатель адиабаты.

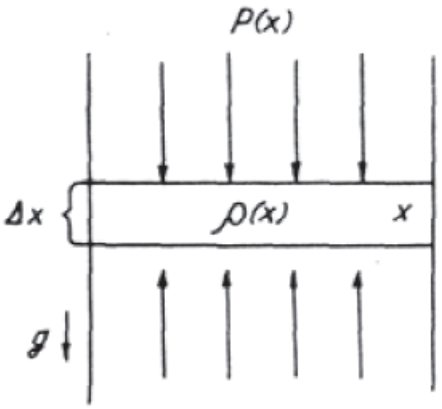

Рис. 3. Элемент объема заряда

С учетом (1) формулу (10) можно записать в виде

$$\left(2\delta/r_0+P_{\text{ат}}\right)\left(\frac{4}{3}\pi r_0^3\right)^{\gamma}=\left(2\delta/r_x+P_x(x)\right)\left(\frac{4}{3}\pi_x^3\right)^3$$

или

$$2\sigma+P_{\text{ат}}r_0=\left[2\sigma\left(\frac{r_0}{r_x}\right)+P(x)r_0\right]\left(\frac{r_x}{r_0}\right)^{3\gamma}, \qquad (11)$$

где $P_{\text{ат}}$ – атмосферное давление.

Уравнения (9) и (11) полностью описывают поставленную задачу, если их дополнить начальными условиями: при $x = 0$

$$P_x=P_0; \quad r_x=r_0. \qquad (12)$$

Введем обозначение $\alpha = r_x/r_0$. Тогда получается система уравнений (9), (11), (12)

$$\begin{cases} \dfrac{dP(x)}{d(x)}=\dfrac{g\rho_0}{1+Z_0\alpha^3}; \\ 2\sigma+P_{\text{ат}}r_0=\left[2\sigma/\alpha+P(x)r_0\right]\left(\dfrac{r_x}{r_0}\right)\alpha^{3\gamma}; \\ P(x)=P_0 \quad \text{и} \quad \alpha=1 \quad \text{при } x=0. \end{cases} \qquad (13)$$

Из (13) при заданных g, ρ_c, ρ_0, r_0, P_0, $P_{\text{ат}}$, δ можно получить $P(x)$, $\alpha(x)$ в любом сечении x, после чего по (7) определяется и $\rho(x)$. Если пренебречь поверхностным натяжением ($\delta = 0$), то (13) принимает вид

$$\frac{dP(x)}{d(x)}=\frac{g\rho_0}{1+Z_0\left(P_0/P(x)\right)^{1/\gamma}}.$$

В этом случае $\alpha^3(x) = P(x)^{1/\gamma}$.

Из общего вида системы (13) видно, что она не имеет аналитического решения, следовательно, требует численного решения. Опишем его алгоритм.

Дифференциальное уравнение (13) совместно с начальными условиями является задачей Коши, которую решаем наиболее простым методом – разностным методом Эйлера (рис. 4) по причине достаточной гладкости и монотонности функций $P(x)$ и $\rho(x)$.

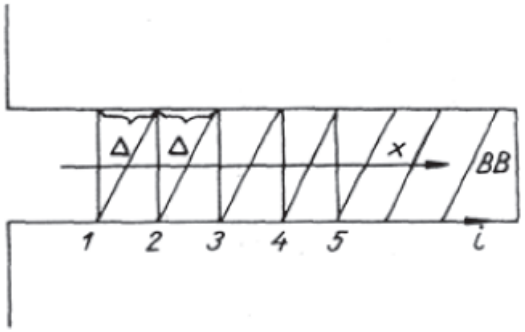

Рис. 4. Разностный метод Эйлера

Алгоритм решения:

$$\begin{cases} P_{i+1}=P_i+g\rho_c\Delta/(1+\alpha_i^3); \\ P_1=P_0. \end{cases} \qquad (14)$$

Второе уравнение системы (13) является трансцендентным. Его решаем итерационным методом – методом бисекции:

$$2\sigma+P_{\text{ат}}r_0=\left[2\delta/\alpha_i+P_ir_0\right]\alpha_i^{3\gamma}. \qquad (15)$$

После этого на каждом шаге по x определяем плотность:

$$\rho_i = \frac{\rho_0}{1 + Z_0 \alpha_i^3}. \qquad (16)$$

Уравнения (14)–(16) решаются совместно. Для этого данный алгоритм реализован в виде программы PUZ на ЭВМ.

Входными данными являются: ρ_c, ρ_0, r_0, P_0, $P_{ат}$, δ. Выходными x, $P(x)$, $\rho(x)$, $\alpha(x)$, (x), δ, где $\delta(x) = (\rho(x) - \rho_0/\rho_0$.

Здесь P_0 берется в общем виде и имеет вид

$$P_0 = P_{ат} + \rho_{заб} g L_{заб},$$

где $\rho_{заб}$ – плотность забойки (например, воды); $L_{заб}$ – длина забойки.

Если $L_{заб} = 0$, то забойка отсутствует.

Оценочные результаты приведены в таблице.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При $r_0 = 0{,}1 – 0{,}01$ мм $P(x)$ и $\rho(x)$ практически не зависят от σ (при $\sigma < \sigma_{маз}$).

2. При $r_0 = 0{,}01$ мм $P(x)$ и $\rho(x)$ зависят от r_0 и σ.

3. Наличие забойки существенно сказывается на $P(x)$ и $\rho(x)$.

4. На глубине больше 10 м $\rho(x) > 1{,}3$ г/см³.

Для расчета зависимости плотности нитронита Э-70 по глубине скважины использованы исходные следующие данные.

Высота водяной забойки равна 7 м. Это значение является максимальным для скважины глубиной до 35 м [2]. В случае, если высота забойки будет меньше, уменьшится гидростатическое давление на эмульсионное ВВ в нижней части скважины, что повысит его детонационную способность. Максимальная предельная плотность нитронита по ТУ 7276-003-58995878-2004 принята равной 1,25 г/см³ [3, 4, 6].

Плотность нитронита Э-70 на различной глубине скважины рассчитывается следующим образом. На слой эмульсионного ВВ, находящегося в скважине на глубине H, действуют следующие силы: $P_А$ – атмосферное давление; $P_В$ – гидростатическое давление столба воды высотой $\Delta h_в$; P_1 – гидростатическое давление столба эмульсионного ВВ высотой Δh_1) [3, 4, 8].

Атмосферное давление $P_А$ принимаем равным 980 Па. Гидростатическое давление столба воды высотой $\Delta h_в = 7$ м; $P_в \sim 686$ Па.

Гидростатическое давление столба ЭВВ высотой Δh можно выразить как $\Delta P = \rho_{ЭВВ} \cdot \Delta h$ (кг/см²), т.е. значение ΔP будет зависеть от высоты слоя Δh и плотности эмульсионного ВВ, которая непрерывно изменяется по высоте этого слоя.

Оценочные результаты

σ, н/м	ρ_0, атм	r, мм	x, м	$P(x)$, атм	ρ, г/см³	δ(x), %
1	2	3	4	5	6	7
0,0355 (мазут)	1 (без забойки)	0,05	8	1,992	1,290	3,221
			12	2,500	1,300	3,984
			18	3,267	1,309	4,729
	1 (без забойки)	0,10	8	1,992	1,290	3,221
			12	2,500	1,300	3,984
			18	3,267	1,309	4,729
	1,668 (6 м воды)	0,05	8	2,696	1,303	4,207
			12	3,208	1,309	4,682
			18	3,979	1,315	5,192
	1,668 (6 м воды)	0,001	8	2,688	1,292	3,394
			12	3,196	1,298	3,860
			18	3,961	1,305	4,402
0	1	0,05	8	1,993	1,291	3,242
			12	2,500	1,300	4,003
			18	3,268	1,309	4,750
	1,668	0,5	8	2,696	1,303	4,229
			12	3,208	1,309	4,703
			18	3,979	1,315	5,212

Примечание. $\rho_c = 1{,}35$ г/см³, $\rho_0 = 1{,}25$ г/см³.

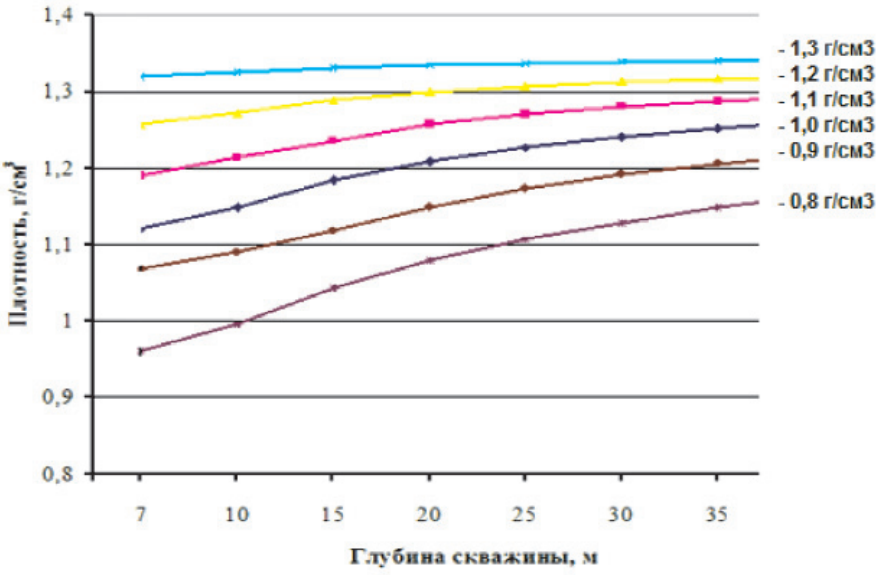

Рис. 5. Изменение плотности нитронита Э-70 в колонке заряда по глубине скважины при различной исходной плотности

Для того чтобы рассчитать плотность на определенной глубине скважины, зададимся каким-либо фиксированным значением P_1. Тогда давление, под которым будет находиться слой эмульсионного ВВ на глубине Н, $P_{H1} = P_A + P_B + P_1$; $P_{H1} \approx 1666$ Па.

Увеличивая последовательно высоту заряда на слой, равный 5 м, рассчитывая аналогичным образом плотность ЭВВ на нижней границе этого слоя, можно проследить изменение плотности эмульсионного ВВ, размещенного на различной глубине скважины. В качестве забойки принят столб воды высотой 7 м. Расчеты сделаны для нитронита Э-70 с различной исходной плотностью (0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3) г/см^3, а их результаты представлены на рис. 5.

Пользуясь этими данными, можно определить плотность нитронита Э-70 для конкретного случая заряжания скважин любой глубины.

Например, необходимо зарядить обводненные скважины глубиной 20 м. На рис. 5 на оси абсцисс находим глубину скважин,

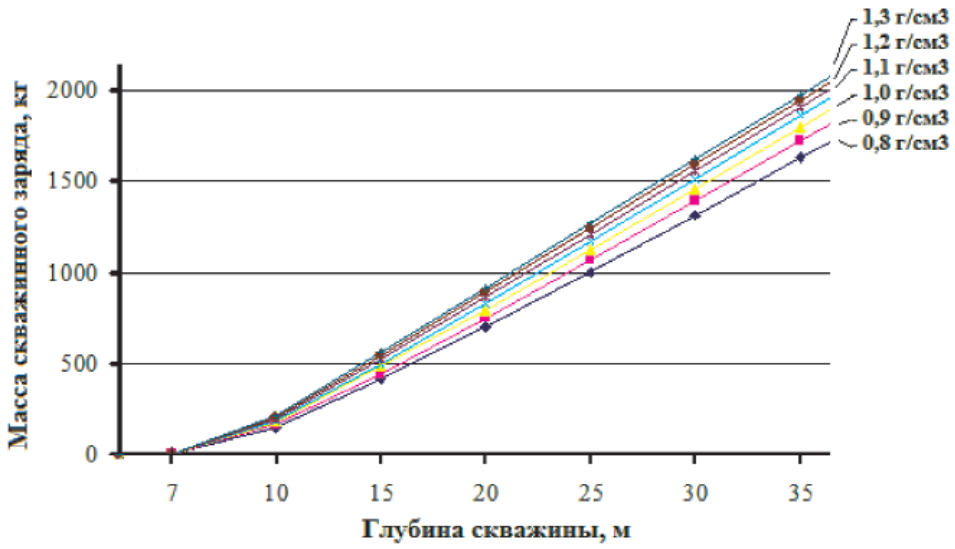

Рис. 6. Зависимость массы заряда нитронита Э-70 от глубины скважины: предельная плотность – 1,3 г/см^3, $d_{скв}$ = 250 мм; забойка – буровая мелочь; P_{AB} = 1,7 кг/см^2

равную 20 м, и идем вверх по вертикали до пересечения с прямой, отвечающей критической плотности, которая для зарядов в прочной оболочке диаметром 250 мм равняется 1,26 г/см^3. Таким образом, заряжать скважины глубиной 20 м следует с исходной плотностью, указанной цифрами у кривых, лежащих ниже горизонтальной прямой критической плотности и левее вертикальной прямой, соответствующей глубине скважины 20 м. Согласно рис. 5 для рассматриваемого примера начальная (исходная) плотность нитронитов Э-70 не должна превышать 1,1 г/см^3 [4].

Массу заряда, которую надо зарядить в скважины различной глубины при различной исходной плотности, можно определить по рис. 6. Для рассматриваемого примера она составит 750 кг.

Аналогично можно провести расчеты для эмульсионных ВВ любой другой плотности при забойке любой высоты с любым удельным весом. Массу заряда, которую нужно зарядить в скважины разной глубины при различной, исходной плотности нитронита Э-70, можно определить по номограмме (рис. 6). Пользуясь этими данными, можно определить исходную плотность нитронита Э-70 для конкретного случая заряжания скважин той или иной глубины.

При глубине скважины более 35 м и при плотности заряжания более 1,3 г/см^3 могут произойти отказы в скважинах, что может привести к несчастным случаям при взрывных работах, а обеспечение надежной детонации скважинных зарядов ВВ является одним из важнейших направлений повышения безопасности взрывных работ.

Список литературы

1. Дерибас А.А., Решетняк А. Исследование влияния добавок в виде полых микросфер на скорость детонации различных конденсированных взрывчатых веществ // Физические проблемы разрушения горных пород: сб. тр. Третьей Междунар. науч. конф. (9–14 сент. 2000 г.). Абаза. – Новосибирск: Наука, 2003. – С. 151–154.

2. Жученко Е. И., Иоффе В. Б., Кукиб Б. Н., Сундуков И. Ю., Оверченко М. Н. Заряжание глубоких скважин эмульсионными ВВ сибиритами на разрезах Кузбасса // Физические проблемы разрушения горных пород: сб. тр. Третьей Междунар. науч. конф. (9–14 семг. 2000 г.). Абаза. – Новосибирск: Наука, 2003. – С. 154–158.

3. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов и др. – М.: Недра, 1988. – 358 с.

4. Синицын В.А. Повышение эффективности подготовки горной массы на карьерах с применением ВВ на основе обратных эмульсий: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. – 145 с.

5. Соснин В.А., Колганов Е.В. Исследование детонационных процессов эмульсионных взрывчатых веществ // Взрывное дело. – 2004. – № 94/5. – С. 181–195.

6. Ударно-волновая чувствительность модельного ЭМ, сенсибилизированного стеклянными микросферами / Б.А. Хасаинов и др. // 12-й симпоз. по горению и взрыву. – Черноголовка, 2000. – С. 15–21.

7. Чижов И.А. Разработка методики расчета радиуса разрушения от взрыва скважинного заряда ВВ при дроблении крепких крупноблочных пород на карьерах: дис. … канд. техн. наук. – Екатеринбург, 1993. – 153 с.

8. Шер Е.Н., Александров П.И. Оценка влияния работы забойки и проникновения газов в среду на разрушающее действие скважинного заряда // Физические проблемы разрушения горных пород: сб. тр. Третьей Междунар. науч. конф. (9–14 септ. 2000 г.). Абаза. – Новосибирск: Наука, 2003. – С. 117–122.