



РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН И ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ

П. И. Афанасьев¹, Х. Ф. Махмудов²

¹*Санкт-Петербургский горный университет,*

Васильевский остров 21, линия 2, г. Санкт-Петербург 199106, Россия

²*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, E-mail: <mailto:h.machmoudov@mail.ioffe.ru>,
ул. Политехническая 26, г. Санкт-Петербург 194021, Россия*

Представлена методика, основанная на теории распада произвольного разрыва (задача Римана), которая позволяет определять параметры ударной волны на стенке взрывной полости. Описаны два возможных варианта преломления детонационных волн, приведены формулы для расчета. Рассмотрены вопросы детонационного разложения эмульсионных взрывчатых веществ. Предложено уравнение состояния, которое дает возможность оценить детонационные параметры с учетом несжимаемого объема молекул газообразных продуктов взрыва.

Аналитическая модель, взрывчатое вещество, ударные волны, преломление детонационной волны, давление взрыва

PROPAGATION OF SHOCK WAVES AND STRESS WAVES IN ROCK

P. I. Afanasyev¹ and Kh. F. Makhmudov²

¹*Industrial Safety Department, Saint Petersburg Mining University,*

Vasil'yevskiy ostrov, 21st Line 2, St. Petersburg 199106, Russia

²*Ioffe Institute, E-mail: <mailto:h.machmoudov@mail.ioffe.ru>,
ul. Polytechnic 26, St. Petersburg 194021, Russia*

This article proposes a method based on the disruption theory of an arbitrary discontinuity (the Riemann problem) to determine the shock wave parameters on the wall of an explosion cavity. Two possible variants of detonation wave refraction on the explosion cavity wall are described. The detonative decomposition of emulsion explosives is also considered, and an equation of state for gaseous explosion products is proposed, which enables the estimation of detonation parameters while accounting for the incompressible volume of molecules.

Analytic model, explosive, shock waves, refraction of a detonation wave, blast pressure

В настоящее время на горных предприятиях используются эмульсионные взрывчатые вещества, которые обладают высокой степенью безопасности при изготовлении, транспортировке, зарядании скважин и хранении [1–4]. Это связано с тем, что в них отсутствуют первичные взрывчатые вещества, такие как тротил, гексоген и др. По своим компонентам эти взрывчатые вещества можно сравнивать с простейшими гранулированными взрывчатыми веществами — игданитами и гранулитами. Эмульсионные взрывчатые вещества, как правило, подразделяются на два вида: “масло в воде” и “вода в масле”. Эмульсионный состав вида “масло в воде” (или прямая эмульсия) по физическим свойствам и химическому составу относится к водонаполненным взрывчатым веществам, так как они содержат в своем составе структурирующий агент и загуститель, а горючим компонентом матрицы эмульсии является топливо в водном растворе окислителя. Устойчивость свойств такой эмульсии поддерживается выбором требуемого эмуль-

гатора. Составы вида “вода в масле” (или обратная эмульсия), называемые эмульгаторами, представляют собой эмульсию высококонцентрированного водного раствора солей окислителя (до 80 % растворенного солей нитрата аммония) в нефтепродуктах. Таким образом, обратные эмульсии обладают более высокой стойкостью к воздействию воды, так как мельчайшие капли раствора окислителя находятся внутри тонкой водонепроницаемой пленки топливной фазы.

При детонации взрывчатых веществ используют две теории: гидродинамическая теория Зельдовича – Неймана – Деринга и теория “горячих точек” [5–7]. Теория “горячих точек” базируется на различных представлениях о строении вещества:

— от сплошной среды до молекулярного строения. Механизмы горения “Горячих точек” заключаются в различных способах возникновения: воспламенение на поверхностях скольжения, непосредственное воспламенение в окрестности схлопывающихся пор, в зонах адиабатического сдвига в кристалле, на берегах распространяющихся трещин;

— в горении частиц взрывчатого вещества, проникающих в газовую полость [8, 9]. В основе всех механизмов лежит тепловой взрыв, который возникает, если скорость химической реакции образования тепла превышает скорость теплоотвода во внешнюю среду. При этом саморазогрев эмульсии происходит по закону Аррениуса без участия разветвленных цепей химической реакции. Теория “Горячих точек” была разработана для описания инициирования взрыва ударом или трением. Следует отметить, что ударно-волновое воздействие отличается от ударного воздействия временем и амплитудой воздействия, а также отсутствием тепла для начала инициирования, так как ударно-волновое воздействие считается адиабатическим. Поэтому для описания детонационного разложения эмульсионного взрывчатого вещества необходимо применять гидродинамическую теорию.

Расчет основных параметров волн напряжений (и ударных волн) в массиве горных пород следует проводить после определения исходных величин волн напряжений на стенке взрывной полости, в работе в качестве стенки рассматривается поверхность скважины. Методы для оценки параметров ударных волн на стенке скважины основаны на взаимодействии идеального газа со стенкой взрывной полости или акустического приближения, но эти методы приводят к заниженным значениям давления, поэтому необходимо использовать уравнение состояния, которое более полно описывает поведение реального газа.

Методы исследования. Поведение продуктов детонации может быть описано уравнением состояния вида [10]:

$$P_d = \frac{\rho_{vv} D^2}{(n+1)(1 - \alpha_{kov} \rho_{vv})}, \quad (1)$$

где n — показатель политропы; $\alpha_{kov} = 10^{-3} e^{-0.4 \cdot 10^{-3} \rho_d}$ — несжимаемый объем молекул [11]; D — скорость детонации, м/с; ρ_{vv} — плотность ВВ, кг/м³; ρ_d — плотность газообразных продуктов взрыва за зоной химической реакции, кг/м³.

Показатель политропы находится из решения уравнения, предложенного Ландау и Станюковичем [11],

$$D^2 = [4A(n+1) + 2(n^2 - 1)]Q + 10^{10} \rho_{vv}^{n-1} b, \quad (2)$$

где A, b — эмпирические коэффициенты.

Плотность газообразных продуктов взрыва рассчитывается по формуле

$$\rho_d = \rho_{vv} \frac{n+1}{(n + \alpha_{kov} \rho_{vv})}. \quad (3)$$

Взаимодействие детонационного фронта на поверхность стенки скважины определяется с помощью общих подходов теории распада произвольного разрыва. Поверхностью произвольного разрыва считается такая часть пространства, на которой газодинамические и термодинамические параметры среды изменяются чрезвычайно быстро. Для расчета в первоначальный момент времени значений ударных волн, которые возникают в непосредственной близости от поверхности скважины между продуктами детонации и горной породой, следует использовать общие закономерности ударной волны, распространяющейся в продуктах детонации и ударной волны в горной породе, которая граничит с зарядом взрывчатого вещества. Еще одним условием, которое определяет искомое решение преломления детонационной волны в горную породу, должно быть равенство давлений и массовых скоростей на поверхности разрыва, которое обеспечивается за счет изменения параметров течения в продуктах детонации.

При преломлении детонационной волны на стенке взрывной полости в горную породу реализуются различные механизмы преломления волн для эмульсионных взрывчатых веществ: 1) значения давлений продуктов детонации могут находиться выше ударной адиабаты горной породы; 2) значения давлений продуктов детонации могут быть ниже ударной адиабаты горной породы.

Скорость частиц в продуктах детонации после преломления детонационной волны, реализуемая по первому варианту,

$$u_f = \Delta u + u_d, \quad (4)$$

где u_d — массовая скорость частиц продуктов детонации, м/с; u_f — массовая скорость частиц в горной породе, м/с; Δu — приращение массовой скорости частиц, м/с.

Приращение массовой скорости можно оценить по изменению скорости частиц в продуктах детонации, данный интеграл получен Г. Риманом [3]:

$$\Delta u = \int_{p_f}^{p_d} \frac{dp}{c\rho}, \quad (5)$$

где ρ — плотность продуктов детонации после преломления; c — скорость звука в продуктах детонации после преломления.

На основании формулы (5) можно получить исходные соотношения:

$$u_d = \frac{D}{n+1} \rho_d = \frac{n+1}{n + \alpha_{kov} \rho_{vv}} \rho_{vv}, \quad c_d = \frac{nD}{n+1} P_d = \frac{\rho_{vv} D^2}{(n+1)(1 - \alpha_{kov} \rho_{vv})}. \quad (6)$$

После преобразований, учитывая несжимаемый объем молекул,

$$c = \left(\frac{p}{p_d} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \frac{(1 - \alpha_{kov} \rho_{vv}) n D}{n+1}, \quad \rho = \left(\frac{p}{p_d} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{\rho_d}{1 - \alpha_{kov} \rho_{vv}}. \quad (7)$$

Далее формулы (7) подставим в интеграл Римана (5), затем произведем интегрирование определенного интеграла по диапазону давлений от детонационного до давления в горной породе и получим формулу

$$\Delta u = \frac{2(n+1)}{(n-1)\rho_{vv}D} P_d \left[1 - \left(\frac{2p_f}{p_d} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right], \quad (8)$$

где p_f — давление на фронте ударной волны в среде, Па; p_d — давление в точке Чемпена-Жуге, Па; D — детонационная скорость, м/с.

Таким образом, после возникновения распада произвольного разрыва суммарная скорость частиц в продуктах детонации составляет

$$u_f = \Delta u + u_d = \frac{2(n+1)}{(n-1)\rho_{vv}D} P_d \left[1 - \left(\frac{2p_f}{P_d} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right] + u_d. \quad (9)$$

Для случая, когда импеданс горной породы выше импеданса взрывчатого вещества, в продуктах детонации распространяется ударная волна вторичного сжатия, а в горной породе — ударная волна [12]. По обе стороны от границы скорости частиц в окружающей среде и в продуктах детонации станут равны

$$u_f = -\Delta u + u_d. \quad (10)$$

Величина приращения массовой скорости для данного случая определяется следующим образом:

$$\Delta u = \sqrt{(p_f - p_d)(v_d - v_f)}. \quad (11)$$

Уравнение Гюгонио для отраженной ударной волны

$$\frac{v_f}{v_d} = \frac{(n+1)p_d + (n-1)p_f}{(n+1)p_f + (n-1)p_d} = \frac{(n-1)\pi + (n+1)}{(n+1)\pi + (n-1)}, \quad (12)$$

где $\pi = p_f / p_d$.

Подставляя уравнение ударной адиабаты Гюгонио в зависимость (12), имеем

$$\Delta u = \sqrt{p_d v_d (\pi - 1) \left(1 - \frac{(n-1)\pi + (n+1)}{(n+1)\pi + (n-1)} \right)}. \quad (13)$$

Подставляя p_d , v_d из (6) и выполнив преобразования, получим

$$\Delta u = (p_f - p_d) \sqrt{\frac{2(n - \alpha_{kov}\rho_{vv})}{\rho_{vv}[(n+1)p_f + (n-1)p_d]}}. \quad (14)$$

Скорость частиц в продуктах детонации после преломления детонационной волны вычисляется по формуле

$$u_f = -(p_f - p_d) \sqrt{\frac{2(n - \alpha_{kov}\rho_{vv})}{\rho_{vv}[(n+1)p_f + (n-1)p_d]}} + u_d. \quad (15)$$

Ударную адиабату горной породы можно представить в следующем виде [9]:

$$p_f = \rho_{пор} \left(C_v + \frac{G+1}{2} u_f \right), \quad (16)$$

где u_f — массовая скорость частиц горной породы; C_v — скорость объемной волны сжатия; G — коэффициент Грюнайзена.

Данный вид ударной адиабаты выбран исходя из физической природы ударного воздействия. Расчетные значения не превышают 100 ГПа и являются волнами слабой интенсивности, поэтому нет необходимости учитывать тепловую составляющую давления. Рассчитываемые давления являются “холодной” составляющей ударного давления. Кроме того, горная порода не является высокопористой, поэтому нет необходимости учитывать сжимаемость пор [13].

Выразив из (16) массовую скорость частиц, а затем, приравняв ее к скорости частиц в продуктах детонации (4), (9), можно рассчитать итерационным методом ударное давление на фронте волны, а затем саму массовую скорость частиц горной породы.

Решение приведенных ранее уравнений позволит найти давление на стенке взрывной полости:

$$\frac{2(n+1)}{(n-1)\rho_{vv}D} p_d \left[1 - \left(\frac{2p_f}{p_d} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right] + u_d - \left(\frac{c_v}{2} + \sqrt{\frac{(\rho_{пор} C_v)^2 + 4p_f \rho_{пор}}{2\rho_{пор}}} \right), \quad (17)$$

$$, \quad -(p_f - p_d) \sqrt{\frac{2(n - \alpha_{kov} \rho_{vv})}{\rho_{vv} [(n+1)p_f + (n-1)p_d]}} + u_d - \left(\frac{c_v}{2} + \sqrt{\frac{(\rho_{пор} C_v)^2 + 4p_f \rho_{пор}}{2\rho_{пор}}} \right). \quad (18)$$

Решение этих уравнений реализовано в математическом пакете Matlab.

Результаты и их обсуждение. Для расчета использовались следующие физико-механические свойства горных пород [14, 15]: гранит — плотность породы $\rho_{пор} = 2600$ кг/м³, скорость продольной волны $C_p = 5000$ м/с, коэффициент Пуассона $\nu = 0.23$, песчаник — $\rho_{пор} = 2200$ кг/м³, $C_p = 2100$ м/с, $\nu = 0.16$; алевролит — $\rho_{пор} = 2200$ кг/м³, $C_p = 1400$ м/с, $\nu = 0.28$.

Основные детонационные характеристики взрывчатых веществ, которые используются в качестве исходных данных, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Детонационные характеристики взрывчатых веществ

Тип ВВ	Основные характеристики			γ	u_d , м/с	P_d , ГПа
	ρ , кг/м ³	Q , кДж/кг	D , м/с			
Нитронит Э-70	1150	3200	5000	3.01	1270	2.15
Эмульсолит А-20	1250	3500	4900	2.86	1268	2.1
ANFO	900	3200	3700	2.66	1012	1.35

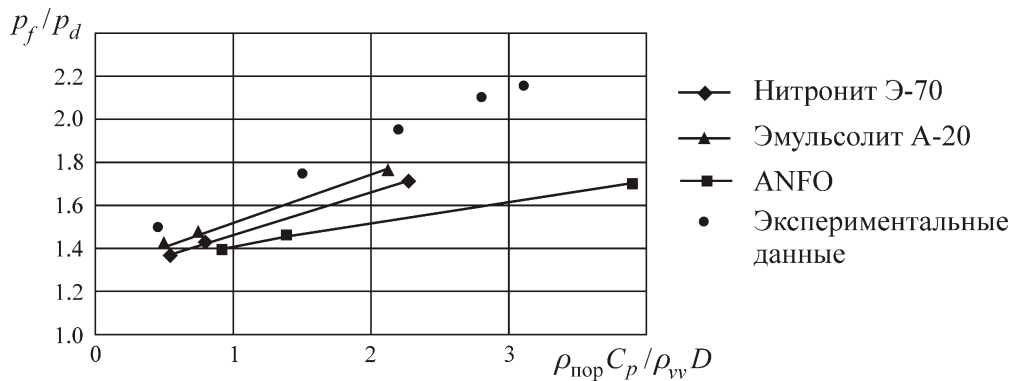
Подставляя исходные данные (табл. 1) в формулы (17) и (18), можно рассчитать параметры преломленной детонационной волны на стенке скважины (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Массовая скорость частиц и напряжение на стенке взрывной полости в горной породе

Тип ВВ	Гранит		Песчаник		Алевролит	
	u_f , м/с	p_f , ГПа	u_f , м/с	p_f , ГПа	u_f , м/с	p_f , ГПа
Нитронит Э-70	354	3.69	669	3.08	740	2.96
Эмульсолит А-20	357	3.72	670	3.08	740	2.96
ANFO	228	2.29	470	1.97	532	1.87

В качестве взрывчатых веществ выбраны нитронит Э-70, эмульсолит А-20 и ANFO. Нитронит Э-70 представляет собой эмульсионное взрывчатое вещество, предназначенное для взрывных работ на месторождениях, ведущих добычу полезного ископаемого открытым способом для горных пород с коэффициентом крепости до 20 по шкале Протодяконова. Представляют собой механическую смесь эмульсии, пористой гранулированной аммиачной селитры, дизельного топлива и газогенерирующей добавки [16].

Экспериментальные данные брались из работы [17] для сравнения с расчетными данными по параметрам волн сжатия на границе взрывной полости. В [17] получена зависимость между отношением импедансов горной породы и взрывчатых веществ к коэффициенту передачи давления в горную породу от газообразных продуктов взрыва. На рисунке нанесены экспериментальные и расчетные точки. Экспериментальные данные получены для ряда промышленных взрывчатых веществ в различных горных породах. Наибольшие значения относятся к акустически жестким породам и высокобризантным взрывчатым веществам.



Зависимость коэффициента передачи давления в горную породу от отношения импедансов ВВ и горной породы

При этом коэффициент передачи давления для разных взрывчатых веществ в одной горной породе имеет незначительное различие (табл. 3). Видно, что несмотря на различия в детонационных параметрах взрывчатых веществ, на ударную адиабату горной породы может передаваться определенная величина детонационного давления [17].

ТАБЛИЦА 3. Коэффициент передачи давления в разные горные породы

Горная порода	Коэффициент передачи давления		
	Нитронит Э-70	Эмульсолит А-20	ANFO
Гранит	1.71	1.77	1.70
Песчаник -20	1.43	1.47	1.46
Алевролит	1.37	1.41	1.40

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что коэффициент передачи давления в разные горные породы для одного взрывчатого вещества изменяется и растет с уменьшением акустического импеданса горной породы. Выбор взрывчатого вещества следует определять при сравнении скорости детонации и скорости продольной волны в массиве, поэтому наиболее оптимальным будет вариант, когда скорость детонации близка к скорости продольной волны. Если при этом необходимо повысить степень дробления горной массы, то следует увеличить плотность заряжения. Для полускальных горных пород, у которых скорость детонации превышает скорость звуковых волн, не следует применять высокобризантные взрывчатые вещества, поскольку коэффициент передачи давления практически не изменяется по сравнению с низкобризантными взрывчатыми веществами, при этом большая часть энергии волны напряжений будет рассеяна на излишнее переизмельчение породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Pancake V. A., Paramonova G. P., and Jamiyan G.** Human Characteristics production and application of mixed explosives of the ANFO type at mining enterprises in Mongolia, *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, 364 pp. [**Белин В. А., Парамонов Г. П., Жимьян Ж.** Особенности изготовления и применения смесевых взрывчатых веществ типа АСДТ на горных предприятиях Монголии // *Записки Горного института*. — 2018. — Т. 232. — 364 с.]
2. **Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N., and Linnik V. Yu.** Assessment of the influence of rock abrasiveness on the parameters of rock-breaking machines, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, 621 pp. [**Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю.** Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин // *Записки Горного института*. — 2019. — Т. 240. — 621 с.]
3. **Sidorenko A. A., Ivanov V. V., and Dmitriyev P. N.** A study of gas drainage methods efficiency in Kotinskaya mine in Russia, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 530–535. [**Сидоренко А. А., Иванов В. В., Дмитриев П. Н.** Исследование эффективности методов отвода газа на шахте “Котинская” в России // *ARNP Журнал инженерных и прикладных наук*. — 2020. — Т. 15. — № 4. — С. 530–535.]
4. **Trushko V. L., and Protosenya A. G.** Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 236, 162 pp. [**Трушко В. Л. и Протосеня А. Г.** Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // *Записки Горного института*. — 2019. — Т. 236. — 162 с.]
5. **Gorinov S. A.** Theoretical estimation of detonation parameters of granaditas, *Mining Information and Mining Information and Analytical Bulletin*, 2010, no. 8, pp. 121–130. [**Горинов С. А.** Теоретическая оценка параметров детонации гранадитов // *ГИАБ*. — 2010. — № 8. — С. 121–130.]
6. **Baum F. A., Stanyukovich K. P., and Shekhter B. I.** *Explosion Physics*, Moscow, Nauka, 1959, 800 pp. [**Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И.** *Физика взрыва*. — М.: Наука, 1959. — 800 с.]
7. **Cook M. A.** *Science of high explosives*, Moscow, Nedra, 1980, 354 pp. [**Кук М. А.** *Наука о взрывчатых веществах*. — М.: Недра, 1980. — 354 с.]
8. **Andreev S. G., Andreev S. G., and Babkin A. V.** *Explosion Physics*, Moscow, Fizmatlit, 2004, vol. 2, 656 pp. [**Андреев С. Г., Андреев С. Г., Бабкин А. В.** *Физика взрыва*. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2. — 656 с.]
9. **Bouden F. and Ioffe A.** *Excitation and development of explosion in solids and liquids*, Moscow, ИЛ, 1955, 120 pp. [**Боуден Ф. П., Иоффе А. Д.** *Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах*. — М.: ИЛ, 1955. — 120 с.]
10. **Afanasyev P. I., Khokhlov S., and Isheyskiy V.** The equation of state for explosive detonation products *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, issue 13, pp. 865–868. [**Афанасьев П. И., Хохлов С., Ишейский В.** Уравнение состояния продуктов детонации взрывчатых веществ // *Междунар. журнал машиностроения и технологий*. — 2018. — Т. 9. — Вып. 13. — С. 865–868.]
11. **Stanyukovich K. P.** *Unstable Motion of Continuous Motion*, Moscow, Fizmatlit, 1971 856 pp. [**Станюкович К. П.** *Неустойчивое движение непрерывного движения*. — М.: Физматлит, 1971. — 856 с.]
12. **Menzhulin M. G. and Brovin B. E.** Formation of longitudinal and volumetric waves in the vicinity of the cavity during the explosion of explosives in rocks, *Journal of Mining Institute*, 2009, vol. 180, pp. 165–168. [**Менжулин М. Г., Бровин Б. Э.** Формирование продольных и объемных волн в окрестности каверны при взрыве ВВ в горных породах // *Записки Горного института*. — 2009. — Т. 180. — С. 165–168.]
13. **Zuev B. Y., Zubov V. P., and Fedorov A. S.** Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals, *Eurasian Mining*, 2019, issue 1, pp. 8–12. [**Зуев Б. Ю., Zubov В. П., Федоров А. С.** Перспективы применения моделей эквивалентных материалов в исследованиях геомеханических процессов при подземной добыче твердых полезных ископаемых // *Евразийская добыча полезных ископаемых*. — 2019. — Вып. 1. — С. 8–12.]

14. **Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov A. A. and Melnikov N. Ya.** Assessment of the strength of a rock mass during the development of deposits by an open method, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 239, 502 pp. [**Павлович А. А., Коршунов В. А., Бажуков А. А. и Мельников Н. Я.** Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // *Записки Горного института*. — 2019. — Т. 239. — 502 с.]
15. **Tsirel S. V., Pavlovich A. A., Mel'nikov N. Y., and Zuev B. Y.** Physical modeling of deformation processes in pit slope with steep bedding, *Journal of Mining Science*, 2019, no. 3, pp. 364–370. [**Цирель С. В., Павлович А. А., Мельников Н. Ю., Зуев Б. Ю.** Физическое моделирование процессов деформирования прибортового массива карьера с крутопадающей слоистостью горных пород // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 3. — С. 22–30.]
16. **Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A.** Technology of explosive breaking of strong valuable ores with a fan arrangement of wells, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 237, 285 pp. [**Соколов И. В., Смирнов А. А., Рожков А. А.** Технология взрывной отбойки крепких ценных руд при веерном расположении скважин // *Записки Горного института*. — 2019. — Т. 237. — 285 с.]
17. **Borovikov V. A., Vanyagin I. F., Menzhulin M. G. and Tsirel S. V.** Stress waves in a watered fissured array, *Schoolbook, Leningrad, Leningrad Mining Institute*, 1989, 85 pp. [**Боровиков В. А., Ванягин И. Ф., Менжулин Ю. Г., Цирель С. В.** Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве / Учеб. пособие. — Л.: ЛГИ, 1989. — 85 с.]