

УДК 622.233

**ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МАШИН
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ**

В. Э. Еремьянц

*Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Н. Ельцина,
E-mail eremjants@inbox.ru, ул. Киевская, 44, 720000, г. Бишкек, Кыргызская Республика*

Рассмотрена производственная система, состоящая из приводного двигателя, компрессора, пневматической ударной машины и обрабатываемой среды. На основе обобщения теоретических и экспериментальных данных установлены зависимости производительности пневматических ударных машин и энергоёмкости процесса разрушения ими горных пород в условиях высокогорья с разреженной атмосферой от высоты рабочей площадки над уровнем моря. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору параметров пневматических машин для работы в условиях высокогорья.

Двигатель, компрессорная станция, пневматическая ударная машина, разрушение пород, высокогорье, атмосферное давление, коэффициент полезного действия, производительность, энергоёмкость

При разработке месторождений полезных ископаемых широко применяются различные пневматические ударные машины: ручные отбойные молотки и бетоноломы, ручные перфораторы и машины для бурения шпуров в горных породах, погружные пневмоударники, навесные пневмомолоты для рыхления мерзлых грунтов и дробления негабаритов горных пород. Энергия удара в этих машинах в зависимости от их типа может составлять от нескольких десятков до нескольких тысяч джоулей.

Эксплуатационные показатели пневматических машин — их производительность и энергоёмкость выполняемого технологического процесса зависят от давления сжатого воздуха, подаваемого к машине от стационарной или передвижной компрессорной станции. При работе таких машин в условиях высокогорья из-за разреженности атмосферы их показатели существенно отличаются от паспортных данных, соответствующих нормальным условиям эксплуатации [1].

В настоящее время в Кыргызской Республике разрабатываются несколько месторождений полезных ископаемых, расположенных на высоте от 2 до 4.5 тыс. м над уровнем моря. В соответствии со шкалой Международной организации гражданской авиации (МОГА) [2] для нормальной атмосферы относительное изменение давления воздуха с высотой над уровнем моря описывается зависимостью

$$\frac{p_h}{p_0} = \left[1 - \frac{0.0065h}{288.15} \right]^{-5.2561}, \quad (1)$$

где p_0 , p_h — соответственно атмосферное давление воздуха на уровне моря и на высоте h , м.

Расчеты по этой формуле показывают, что на высоте от 4 до 4.5 тыс. м давление воздуха составляет $(0.608 - 0.570)p_0$, т. е. почти половину от нормального на уровне моря. Это, как показано в [1], может существенно влиять на производительность и энергоемкость машин. Таким образом, возникла необходимость более подробного рассмотрения влияния условий высокогорья на эксплуатационные показатели пневматических ударных машин применительно к работе на месторождениях Кыргызстана.

Действительные значения давлений, измеренные на рабочих площадках месторождения Кумтор, расположенных на высоте 4–4.5 тыс. м, по данным [3] составили 442 и 467 мм рт. ст., что на широте $41 - 42^\circ$ соответствует $0.620 - 0.587$ МПа. Эти значения отличаются от полученных по формуле (1) на 2–3 %, что свидетельствует о возможности ее использования для дальнейшего анализа влияния высоты над уровнем моря на атмосферное давление воздуха. Необходимо отметить, что в диапазоне изменения высот от 0 до 4 тыс. м зависимость (1) близка к линейной и может быть с погрешностью, не превышающей 2 %, аппроксимирована функцией

$$\frac{p_h}{p_0} = 1 - 10^{-4} h. \quad (2)$$

Рассмотрим систему (рис. 1), состоящую из приводного двигателя Д, компрессора К, ударной машины УМ и разрушаемой горной породы ГП. Двигатель, компрессор и ударная машина характеризуются потребляемой мощностью N и коэффициентом полезного действия η , а горная порода — удельной энергоемкостью разрушения q , под которой понимаются затраты энергии на разрушение единицы объема породы.

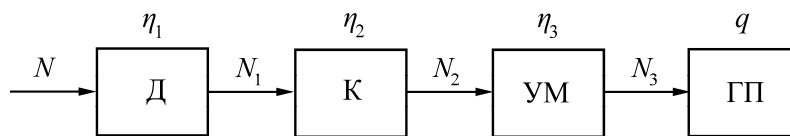


Рис. 1. Структурная схема цепи преобразования энергии

Влияние условий высокогорья на характеристики компрессора. Примем, что в качестве источника энергии используется электрический асинхронный двигатель переменного тока, приводящий в движение вал поршневого компрессора. В зависимости от типа двигателя коэффициент его полезного действия η_1 при номинальной нагрузке лежит в пределах $0.8 - 0.9$. При изменении отношения действующей нагрузки к номинальной от 0.5 до 1.25 этот коэффициент изменяется несущественно [4], и можно считать его значение постоянным. Тогда мощность на валу компрессора N_1 запишется как $N_1 = N\eta_1$ (N — мощность, потребляемая двигателем из сети).

Мощность на выходе из компрессора N_2 обусловлена мощностью политропного сжатия газа [5–7]:

$$N_2 = m(m-1)^{-1} p_a Q \left[\left(\frac{p_1}{p_a} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (3)$$

где m — показатель политропы; p_a — атмосферное давление на входе в компрессор; Q — производительность компрессора; p_1 — давление на выходе компрессора.

Отношение p_1 / p_a определяется размерами камеры сжатия и для данного компрессора является постоянным. Например, для компрессора с давлением сжатого воздуха в нормальных атмосферных условиях $p_1 = 0.7$ МПа отношение $p_1 / p_a = 7$.

В соответствии с (2) на высоте h давление на выходе компрессора p_{h1} будет следующим:

$$p_{h1} = p_{01}(1 - 10^{-4}h), \quad (4)$$

где p_{01} — давление на выходе компрессора при нормальном атмосферном давлении.

Для оценки мощности, затрачиваемой на работу компрессора в условиях высокогорья, примем некоторые допущения. Производительность конкретного компрессора зависит только от числа оборотов его вала и размеров камеры сжатия и не зависит от атмосферного давления, влажности и температуры воздуха [5]. Показатель политропы m в исследуемом диапазоне изменения температур и давлений также постоянный. Из (3) следует, что при этих допущениях мощность на выходе компрессора прямо пропорциональна атмосферному давлению.

Потребляемая компрессором мощность складывается из мощности политропного сжатия газа N_2 (3) и мощности, расходуемой на преодоление сил трения внутри компрессора и работу вспомогательных устройств N_{2T} . Тогда для мощности, потребляемой двигателем из электрической сети, можно записать:

$$N = \frac{N_2 + N_{2T}}{\eta_1 \eta_2}.$$

Здесь η_2 — коэффициент полезного действия компрессора.

Принимая, что мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в компрессоре и работу вспомогательных устройств, пренебрежимо мала по сравнению с мощностью политропного сжатия газа, последнюю формулу можно представить в виде

$$N = C_0 p_a, \quad (5)$$

где $C_0 = (m(m-1)^{-1} Q[(p_1 / p_a)^{m-1/m} - 1]) / \eta_1 \eta_2$ — постоянная величина.

Из (5) следует, что мощность, потребляемая двигателем компрессора на высоте h (N_h), связана с мощностью, потребляемой на уровне моря N_0 , соотношением

$$N_h = N_0(1 - 10^{-4}h). \quad (6)$$

Большая часть пневматических ударных машин, выпускаемых в Российской Федерации [8–14], рассчитана на рабочее давление 0.5 МПа. В зарубежных аналогичных машинах рабочее давление составляет 0.6–0.7 МПа. В большинстве компрессорных станций с производительностью до 0.2 м³/с давление нагнетания равно 0.7 МПа [8]. Исключение составляют компрессорные станции для мощных погружных пневмоударников, которые создают давление до 2.5 МПа [11, 14]. Из (4) следует, что на высоте 4 тыс. м давление на выходе компрессора вместо 0.7 МПа будет 0.42 МПа, что недостаточно для нормальной работы ударных машин.

Влияние условий высокогорья на характеристики ударной машины. Основными характеристиками ударной машины являются энергия единичного удара A , частота ударов n и ударная мощность N_3 , равная произведению энергии удара на частоту ударов. При определении этих характеристик примем, что потери давления в трубопроводах пренебрежимо малы и давление на входе ударника равно давлению на выходе компрессора p_1 .

Согласно [12], энергия единичного удара A , частота ударов n и ударная мощность N_3 определяются как

$$A = \frac{0.75 p_1 F s_k (1 + \psi_k)^2}{2 + \psi_k}, \quad \psi_k = \frac{p_k}{p_1}, \quad (7)$$

$$n = p_1^{0.5} \left[\frac{F(2 + \psi_k)}{6m_1 s_k} \right]^{0.5} (1 + \beta)^{-1}, \quad (8)$$

$$N_3 = p_1^{1.5} (1 + \psi_k)^2 (1 + \beta)^{-1} \left[\frac{3F^3 s_k}{32m_1} (2 + \psi_k) \right]^{0.5}, \quad (9)$$

где p_1 — давление на входе в машину; p_k — давление в рабочей камере перед выхлопом; F — площадь сечения ударника со стороны камеры рабочего хода; s_k — путь ударника в период прямого хода до начала выхлопа; m_1 — масса ударника; β — коэффициент, определяемый на основе испытаний данной машины.

Поскольку значения F , s_k , ψ_k , m_1 , β не зависят от атмосферного давления, а величины p_{01} на уровне моря и p_{h1} на высоте h связаны соотношением (4), характеристики ударной машины (7)–(9) на высоте h можно записать через характеристики на уровне моря A_0 , n_0 , N_{30} в следующем виде:

$$A_h = (1 - 10^{-4} h) A_0, \quad n_h = (1 - 10^{-4} h)^{0.5} n_0, \quad N_{3h} = (1 - 10^{-4} h)^{1.5} N_{30}. \quad (10)$$

Из полученных формул видно, что с увеличением высоты рабочей площадки над уровнем моря энергия удара машины уменьшается прямо пропорционально высоте, частота удара уменьшается пропорционально корню квадратному из высоты, а ударная мощность уменьшается в степени $3/2$.

Влияние энергии удара на удельную энергоёмкость разрушения горной породы. Установлено [11, 13–17], что в горном деле и строительстве для большинства технологических процессов, использующих ударные машины, зависимость удельной энергоёмкости от энергии удара имеет гиперболический вид.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости удельной энергоёмкости разрушения мрамора, гранита и кварцита от удельной энергии удара A_l , приходящейся на единицу длины лезвия породоразрушающего инструмента [13]. Площадка притупления лезвия имела ширину 2 мм. Исследования проводились на погружных пневмоударниках при скоростях удара 7 и 9 м/с. Отмечено, что формы зависимостей $q(A_l)$ в обоих случаях идентичны. Похожие зависимости удельной энергоёмкости разрушения породы от энергии, приходящейся на единицу площади контакта инструмента с забоем, при бурении погружными пневмоударниками приведены в [15].

Аналогичные кривые получены при разрушении породы острым инструментом и инструментом со сферическими вставками. Результаты исследований [13] показали, что при увеличении удельной энергии удара до 5 кДж/м происходит резкое снижение удельной энергоёмкости разрушения, а с дальнейшим увеличением A_l она практически не меняется. В качестве оптимальных значений рекомендуется для острого лезвия принимать A_l , равной 2–3 кДж/м, а для затупленного — 3–4 кДж/м.

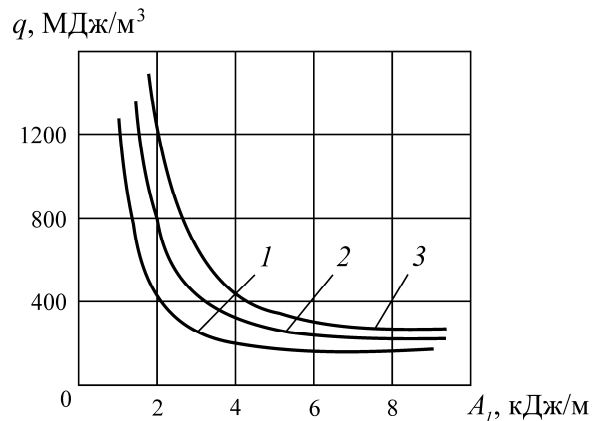


Рис. 2. Зависимость удельной энергоемкости разрушения породы от удельной энергии удара: 1 — мрамор; 2 — гранит; 3 — кварцит [13]

В [11] представлены экспериментальные зависимости удельной энергоемкости разрушения мрамора и гранита от энергии удара при использовании четырех типов бойков различного диаметра и длины. Крепость мрамора и гранита составляла соответственно 5–6 и 10–14 по шкале Протодьяконова. В экспериментах использовали буровую штангу диаметром 25 мм и долотчатую буровую коронку диаметром 46 мм. На рис. 3 приведены результаты для двух типов бойков. Боек длиной 0.4 м и диаметром 40 мм характерен для гидравлических перфораторов, а боек длиной 0.158 м и диаметром 70 мм близок по параметрам к бойкам пневматических перфораторов.

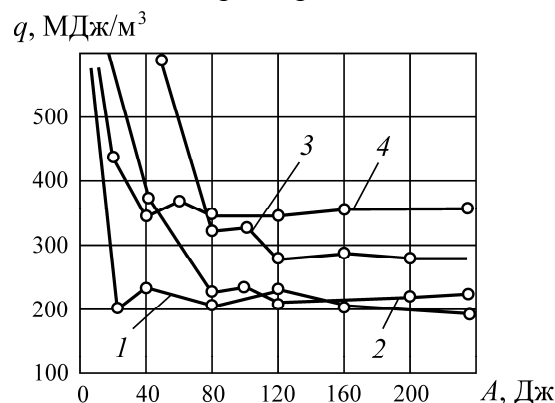


Рис. 3. Зависимость удельной энергоемкости разрушения породы от энергии удара: 1, 2 — боек диаметром 40 мм и длиной 0.4 м; 3, 4 — боек диаметром 70 мм и длиной 0.158 м; 1, 3 — гранит; 2, 4 — мрамор [11]

В [11] показано, что зависимость удельной энергоемкости разрушения породы от энергии единичного удара имеет гиперболический характер. Критическое значение энергии удара, после которого удельная энергоемкость разрушения породы практически не меняется, для мрамора составляет 40 Дж, а для гранита 80 Дж. В пересчете на единицу длины лезвия долотчатой коронки диаметром 46 мм этим энергиям соответствует 0.87 и 1.74 кДж/м.

Отметим, что при ударе длинным бойком (рис. 3, кривые 1, 2) удельная энергоемкость разрушения породы в 1.5 раз меньше, чем при ударе коротким бойком (кривые 3, 4). Для длинного бойка она составляет 200 МДж/м³, а для короткого 300–350 МДж/м³. Эти значения близки к полученным в [13] (рис. 2), что подтверждает их достоверность.

На рис. 4 представлены зависимости удельной энергоемкости разрушения мерзлого супесчаного грунта с температурой -8.1°C от энергии удара при забивании в него пневмомолотом клина шириной 0.1 м с углом приострения 10 и 20° [14]. Аналогичные кривые получены и при забивании клина в суглинки. По результатам, полученным при разных условиях эксперимента, в [14] предложена эмпирическая формула для расчета удельной энергоемкости разрушения мерзлых грунтов: $q = (7.83 \cdot 10^5) / A + 1035$ кДж/м³.

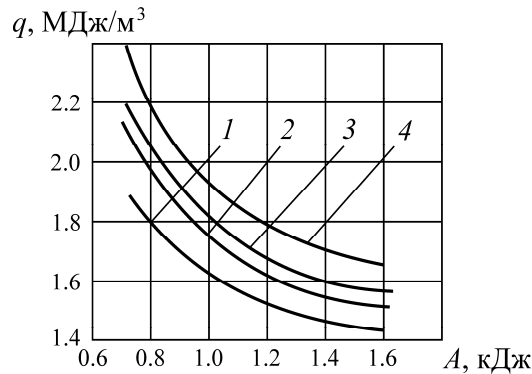


Рис. 4. Зависимость энергоемкости разрушения мерзлого грунта от энергии единичного удара: 1, 2 — частота ударов 5 Гц; 3, 4 — частота ударов 1.25 Гц; 1, 3 — угол приострения клина 10° ; 2, 4 — угол приострения клина 20° [14]

Зависимости общей энергии дробления негабаритов горных пород от энергии единичного удара (рис. 5) построены на основе результатов опытно-промышленных испытаний и экспериментальных исследований [14], проведенных в Московском геологоразведочном институте, Государственном институте горно-химического сырья, Институте горного дела СО РАН. В [14] предложена эмпирическая формула для определения общей энергии дробления негабарита объемом V с крепостью породы f по шкале Протоджьяконова: $E = 600Vf^2 / A$ (кДж). Из нее следует, что удельную энергоемкость дробления негабарита можно найти как $q = 600f^2 / A$ (кДж/м³).

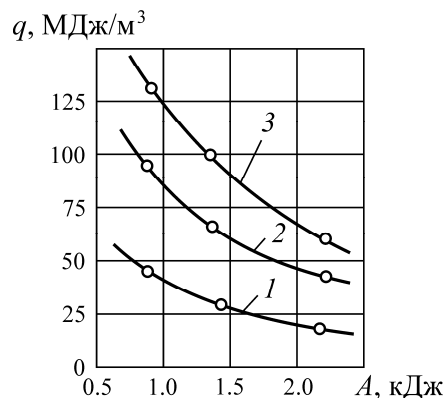


Рис. 5. Зависимость энергоемкости дробления негабаритов от энергии единичного удара для пород различной крепости f : 8 (1); 10 (2); 14 (3) [14]

Таким образом, проведенный обзор литературных источников показывает, что несмотря на различные параметры породоразрушающего инструмента и бойка ударной машины, характер изменения удельной энергоемкости разрушения пород в зависимости от энергии удара при рыхлении мерзлых грунтов, бурении шпуров и скважин в горных породах и дроблении негаба-

ритов горных пород одинаков. При увеличении энергии удара до определенного критического значения удельная энергоёмкость изменяется по гиперболическому закону, после чего остается практически постоянной.

Влияние условий высокогорья на техническую производительность пневматических машин и энергоёмкость выполняемого ими технологического процесса. Для оценки влияния условий высокогорья на работу пневматических машин в качестве основных показателей примем их техническую производительность v и энергоёмкость выполняемого технологического процесса W . Под технической производительностью машины условимся понимать объем разрушенной породы в единицу времени без учета времени на вспомогательные операции. Под энергоёмкостью технологического процесса понимаются удельные затраты энергии на разрушение единицы объема горной породы.

Объем горной породы, разрушаемой в единицу времени, находится как отношение ударной мощности машины N_3 к удельной энергоёмкости разрушения породы q : $v = N_3 / q$. Энергоёмкость технологического процесса определяется как отношение мощности, потребляемой приводом компрессорной станции N к объему породы, разрушенной в единицу времени: $W = N / v$.

Проведем анализ зависимости этих показателей от высоты рабочей площадки над уровнем моря в безразмерных единицах по их отношению к аналогичным показателям в нормальных атмосферных условиях:

$$\frac{v_h}{v_0} = \frac{N_{3h}q_0}{N_{30}q_h}, \quad \frac{W_h}{W_0} = \frac{N_h v_0}{N_0 v_h}. \quad (11)$$

Здесь индекс “ h ” соответствует высоте h над уровнем моря, а индекс “ 0 ” — уровню моря.

Подставляя в эти соотношения формулы (6), (10), запишем:

$$\frac{v_h}{v_0} = (1 - 10^{-4} h)^{1.5} \frac{q_0}{q_h}, \quad (12)$$

$$\frac{W_h}{W_0} = (1 - 10^{-4} h)^{-0.5} \frac{q_h}{q_0}. \quad (13)$$

Возможны два случая. В первом при большой энергии единичного удара с увеличением высоты снижение энергии не приводит к достижению критического значения, при котором начинается резкий рост энергоёмкости. Здесь отношение $q_h / q_0 = 1$ и зависимости (12), (13) имеют вид, показанный на рис. 6 кривыми 1.

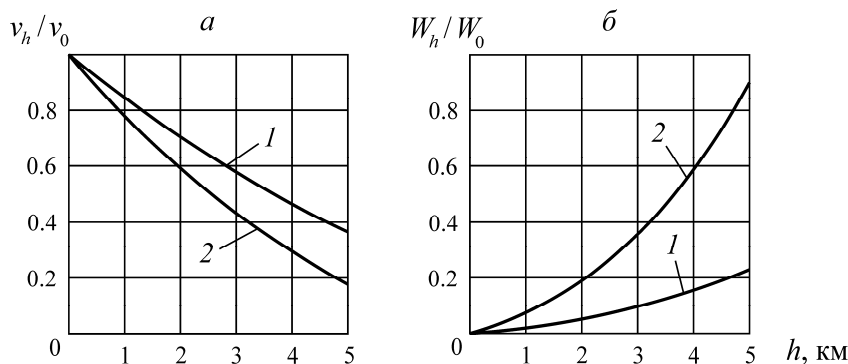


Рис. 6. Диаграммы зависимости технической производительности (а) и энергоёмкости технологического процесса (б) от высоты рабочей площадки над уровнем моря: 1 — $q_h / q_0 = 1$; 2 — $q_h / q_0 = A_0 / A_h$

Во втором случае, когда удельная энергия удара становится меньше критической величины, примем $q = C_1 / A$ (C_1 — коэффициент, не зависящий от высоты рабочей площадки над уровнем моря и определяемый параметрами бойка ударной машины, инструмента и крепости горной породы). Тогда

$$\frac{q_0}{q_h} = \frac{A_h}{A_0} = 1 - 10^{-4} h$$

и зависимости (12), (13) принимают вид:

$$\frac{v_h}{v_0} = (1 - 10^{-4} h)^{2.5}, \quad \frac{W_h}{W_0} = (1 - 10^{-4} h)^{-1.5}.$$

Диаграммы, соответствующие этим зависимостям, показаны на рис. 6 кривыми 2.

Из рис. 6 видно, что на высоте 4–4.5 тыс. м в первом случае техническая производительность машины снижается в 2.15–2.45 раза, а удельная энергоемкость технологического процесса возрастает 1.29–1.35 раза. Во втором случае на этих высотах техническая производительность снижается в 3.58–4.46 раза, а энергоемкость процесса возрастает в 2.15–2.45 раза.

Рассмотрен случай, когда привод компрессорной станции осуществляется от электрического двигателя, работа которого практически не зависит от атмосферного давления. При оснащении компрессорных станций двигателями внутреннего сгорания, в работе которых используется атмосферный воздух, влияние высокогорья на показатели работы пневматических ударных машин будет еще больше.

Это убедительно показано в [13], где приводятся данные влияния высоты отметки местности h на изменение производительности Q компрессора ПК-10 с дизельным приводом:

Высота h , м	0	500	1000	1500	2000	3000	4000
Производительность Q , м ³ /с	0.167	0.147	0.132	0.117	0.103	0.083	0.063

На основании этих результатов в [13] сделан вывод, что на высоте 1000 м производительность компрессора снижается на 20%. Отмечено, что уменьшение давления сжатого воздуха на 0.1 МПа снижает скорость бурения геологоразведочных скважин пневмоударниками на 20–25%. Добавим к этому, что на высоте 4000 м производительность компрессора с дизельным приводом в 2.6 раза ниже, чем при нормальных атмосферных условиях на уровне моря.

ВЫВОДЫ

Установлена зависимость производительности пневматических ударных машин от высоты рабочей площадки над уровнем моря, учитывающая влияние разреженности атмосферы на выходные характеристики компрессорной станции и пневматической ударной машины. Показано, что на высоте 4–4.5 тыс. м производительность машины может снижаться в 2.5–4.5 раза. Показана зависимость энергоемкости процесса разрушения горных пород пневматическими ударными машинами от высоты рабочей площадки над уровнем моря. На высоте 4–4.5 тыс. м она может увеличиваться в 1.3–2.4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремьянц В. Э. Влияние условий высокогорья на производительность и энергоемкость пневматических ударных машин // Наука и новые технологии. — 1997. — № 4. — С. 103–110.
2. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных: пер. с англ. под ред. К. П. Яковлева. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962. — 248 с.

3. **Бурабаева А. А.** Физиолого-гигиеническая характеристика труда бурильщиков колонкового бурения глубоких скважин в условиях высокогорья Кыргызстана: автореф. дис. ... канд. мед. наук. — Бишкек: КГМА, 2000. — 19 с.
4. **Общая электротехника** / под ред. Л. Т. Блажкина. — Л.: Энергия, 1971. — 544 с.
5. **Бобровский С. А., Соколовский С. М.** Гидравлика, насосы и компрессоры. — М.: Недра, 1972. — 296 с.
6. **Касьянов В. М.** Гидромашины и компрессоры. — М.: Недра, 1981. — 205 с.
7. **Навроцкий К. Л.** Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. — М.: Машиностроение, 1991. — 384 с.
8. **Васильев В. М.** Перфораторы: справочник. — М.: Недра, 1989. — 216 с.
9. **Есин Н. Н., Костылев А. Д., Гурков К. С., Смоляницкий Б. Н.** Пневматические машины ударного действия для проходки скважин и шпуров. — Новосибирск: Наука, 1986. — 214 с.
10. **Медведев И. Ф.** Режимы бурения и выбор буровых машин. — М.: Недра, 1986. — 223 с.
11. **Иванов К. И., Варич М. С., Дусев В. И., Андреев В. Д.** Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1974. — 408 с.
12. **Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К.** Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1985. — 134 с.
13. **Куликов И. В., Воронов В. Н., Николаев И. И.** Пневмоударное бурение разведочных скважин. — М.: Недра, 1989. — 235 с.
14. **Лобанов Д. П., Горовиц В. Б., Фонберштейн Е. Г. и др.** Машины ударного действия для разрушения горных пород. — М.: Недра, 1983. — 152 с.
15. **Липин А. А.** Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. — 2005. — № 2. — С. 74–79.
16. **Захаров Е. В., Курилко А. С.** Локальный минимум энергоемкости разрушения скальных пород в диапазоне отрицательных температур // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 94–98.
17. **Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н.** Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 60–75.

Поступила в редакцию 5/V 2017