



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМОУДАРНОГО УСТРОЙСТВА
С ПОНИЖЕННЫМ УДЕЛЬНЫМ РАСХОДОМ СЖАТОГО ВОЗДУХА**

П. Н. Тамбовцев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: tambovskiyp@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлены результаты экспериментальных исследований пневмоударного устройства, воздухораспределительная система которого имеет две управляемых камеры сжатого воздуха и четыре клапана. Особенность пневмоударного устройства заключается в его эффективном рабочем цикле с пониженным удельным расходом сжатого воздуха. Исследован рабочий цикл лабораторного образца и определены его основные показатели: частота и энергия ударов, расход сжатого воздуха. Выполнен сравнительный анализ результатов экспериментов и численного моделирования.

Пневмоударное устройство, клапанное воздухораспределение, эксперименты, рабочий цикл, диаграммы давлений, расход сжатого воздуха, энергия удара

**EXPERIMENTAL STUDIES OF PNEUMATIC IMPACT DEVICE
WITH A REDUCED SPECIFIC CONSUMPTION OF COMPRESSED AIR**

P. N. Tambovtsev

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: tambovskiyp@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The article presents the results of experimental studies of a pneumatic impact device, the air distribution system of which has two controlled chambers of compressed air and four valves. This pneumatic impact device has an efficient operating cycle with a reduced specific consumption of compressed air. The operating cycle of a laboratory prototype was investigated and its main operating parameters were determined: frequency and energy of impacts, compressed air consumption. A comparative analysis of experimental results with the results of numerical simulation is carried out.

Pneumatic impact device, valve air distribution, experiments, operating cycle, pressure diagrams, compressed air consumption, impact energy

Научно-исследовательские и конструкторские работы, связанные с созданием и внедрением пневматических машин ударного действия в горную промышленность, являются одним из основных направлений деятельности ИГД СО РАН. В настоящее время актуальными разработками в этой сфере остаются погружные пневмоударники для бурения скважин в породах [1 – 6]. Здесь ведутся работы, направленные на совершенствование пневмоударников, а также на создание принципиально новых конструктивных схем, обеспечивающих повышение ударной мощности и энергии удара при снижении удельного расхода сжатого воздуха. Для известных моделей погружных пневмоударников, разработанных в ИГД СО РАН, удельный расход составляет $(28 - 44) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$ [7].

Предлагается создать погружной пневмоударник для бурения крепких пород, в основу конструкции которого положена новая принципиальная схема ударного механизма (рис. 1), обеспечивающая высокую ударную мощность и низкий удельный расход q . Результаты компьютерного

моделирования рабочего цикла показали, что расчетный удельный расход q имеет значение $13.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$ [7]. Величина этого показателя повысила практический интерес к созданию и экспериментальному исследованию нового устройства.

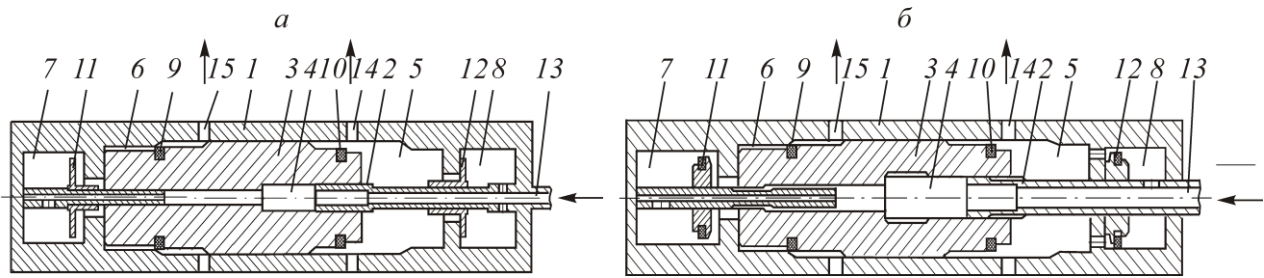


Рис. 1. Принципиальная схема нового пневмоударного механизма: *а* — два упругих и два пластинчатых клапана, *б* — четыре упругих клапана: 1 — корпус; 2 — патрубки; 3 — ударник; 4 — камера прямого хода; 5 — дополнительная камера прямого хода; 6 — камера обратного хода; 7, 8 — накопительные камеры; 9, 10 — упругие клапаны на ударнике; 11, 12 — клапаны отсечки; 13 — магистральный канал; 14, 15 — выхлопные отверстия

Цель экспериментальных исследований — установить работоспособность нового пневмоударного механизма, получить диаграммы давлений в камерах сжатого воздуха, измерить расход сжатого воздуха и количественно оценить параметры его рабочего цикла: энергию и частоту удара, удельный расход. Для проведения экспериментов по измерению диаграмм давлений использовался горизонтальный испытательный стенд и физическая модель нового пневмоударного механизма (рис. 2). Лабораторный образец 9 устанавливался между стальными нижней 1 и верхней 2 рамами с резиновыми подкладками, стягивался болтовыми зажимными устройствами 5.

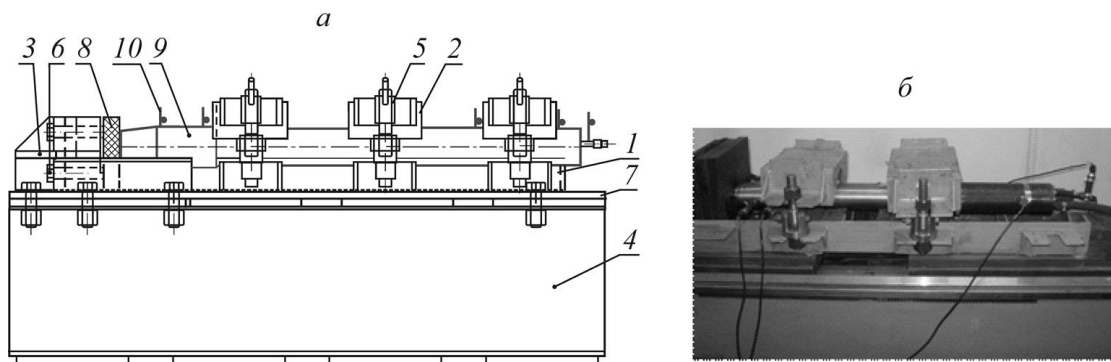


Рис. 2. Испытательный стенд для пневмоударных машин: *а* — схема стенда (1 — рама нижняя; 2 — рама верхняя; 3 — рама торцевая; 4 — станина на фундаменте; 5 — болтовые зажимы; 6 — торцевые болты; 7 — резина; 8 — работапоглотитель; 9 — пневмоударная машина; 10 — датчики давления); *б* — внешний вид стенда с лабораторным образцом и датчиками давления в камерах сжатого воздуха и магистрали

Комплекс измерительной аппаратуры включал датчики давления (Honeywell, M7139-200PG-50000), аналого-цифровой преобразователь (АЦП, L-Card E-440), персональный компьютер (ПК, Samsung R428) (рис. 3). Датчики давления фиксировали сигналы, которые через АЦП регистрировались на ПК, обработка результатов измерений производилась при помощи программы Power Graph 3.3. На рис. 3а показана схема установки датчиков давления на ударном устройстве и их подключение к АЦП, на рис. 3б, в показан внешний вид проводимых стендовых экспериментов. Для измерения расхода сжатого воздуха использовался расходомер (Digital flow switch PF2A706H – F14-28) (рис. 3г).

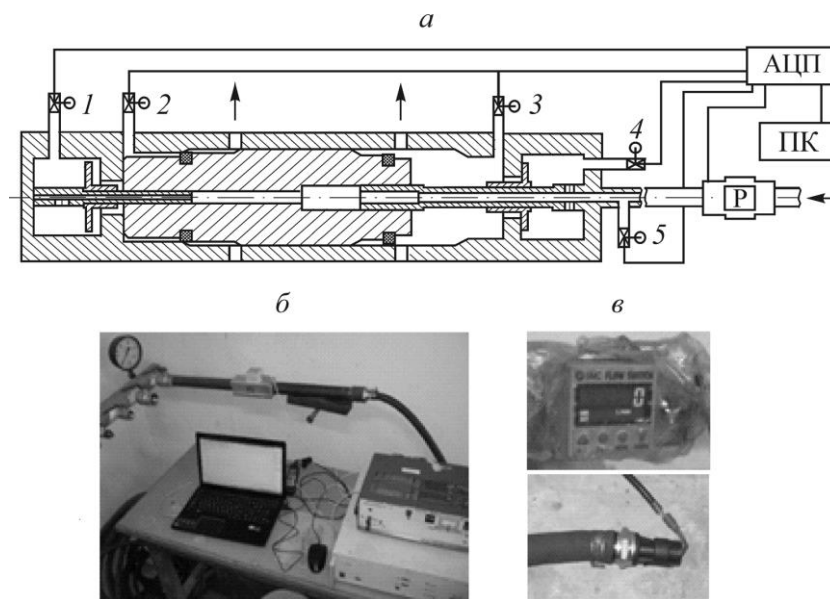


Рис. 3. Измерительный комплекс для определения диаграмм давления и расхода сжатого воздуха: *a* — схема установки датчиков давления на лабораторный образец и подключение АЦП (аналого-цифровой преобразователь) и ПК (персональный компьютер): 1 — датчик измерения в передней накопительной камере; 2 — в камере обратного хода; 3 — в дополнительной камере прямого хода; 4 — в задней накопительной камере; 5 — в магистральном канале связанным с камерой прямого хода; *б* — измерительная аппаратура (манометр, расходомер, АЦП, ПК); *в* — расходомер Digital flow switch PF2A706H –F14-28, датчик давления M7139-200PG

Лабораторный образец ударного устройства показал стабильную работу в диапазоне давлений 0.5–0.7 МПа. На рис. 4*a, в* представлены показания экспериментов по снятию диаграмм давлений в камерах лабораторного образца и мгновенного расхода сжатого воздуха при давлении в магистрали на выходе из компрессора 0.6 МПа, диаграммы выведены в программе Power Graph 3.3. На рис. 4*б, г* показаны обработанные диаграммы давлений и расхода в виде графиков $p_i(t)$ и $Q_i(t)$, отражающие рабочий цикл устройства. Из анализа графиков (рис. 4*б*) следует: сопротивление движению ударника при прямом ходе сведено к минимуму со стороны камеры обратного хода (участок кривой p_3 т. 3-4), при обратном ходе ударника практически отсутствует сопротивление движению ударника от давления сжатого воздуха со стороны дополнительной камеры прямого хода (участок кривой p_3 т. 6-7); клапаны отсечки своевременно обеспечивают подачу сжатого воздуха в камеру обратного хода (КОХ) (кривая p_2 , т. 4) и в дополнительную камеру прямого хода (КПХ) (кривая p_3 , т. 7), при этом они перекрывают доступ сжатому воздуху из накопительных камер (кривая p_2 , т. 1; кривая p_3 , т. 9) до момента начала выхлопа (кривая p_2 , т. 2; кривая p_3 : т. 10), после отсечки подачи сжатого воздуха в рабочие камеры продолжается процесс его расширения (кривая p_2 , т. 1, 2; кривая p_3 , т. 9, 10), в момент начала выхлопа действует низкое избыточное давление ($p_2 = 0.07$ МПа, т. 2; $p_3 = 0.08$ МПа, т. 10). На рис. 4*в* представлен график мгновенного расхода сжатого воздуха при избыточном магистральном давлении $p = 0.6$ МПа, средний абсолютный расход сжатого воздуха составил $Q_{\text{ср}} = 1.3$ м³/мин.

Количественные значения выходных параметров рабочего процесса пневмоударного устройства определялись путем графической и математической обработки диаграмм давления [8]. В результате построены график результирующей силы $R(t)$ (рис. 4*д*), действующей на ударник, на рис. 4*е* — график перемещения ударника в период цикла. По формулам (табл. 1) найдены

параметры рабочего цикла. Лабораторный образец пневмоударного механизма с массой ударника 18.5 кг имеет следующие экспериментальные значения показателей рабочего цикла: энергия единичного удара — 206 Дж, частота — 6.41 Гц, ход ударника — 172 мм, расход воздуха — $1.3 \text{ м}^3/\text{мин}$, ударная мощность $N = 1320 \text{ Вт}$, удельный расход $16.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$.

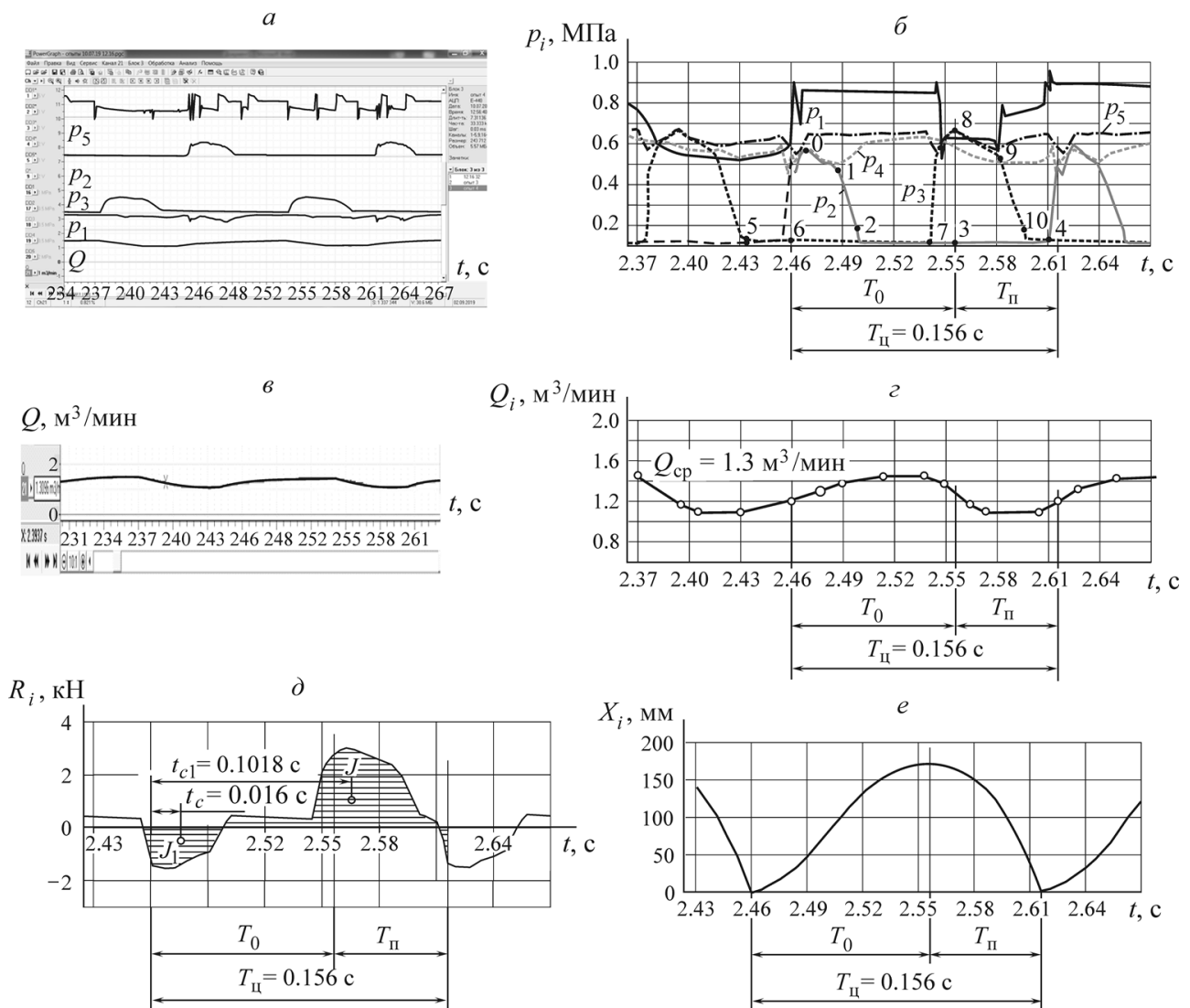


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы рабочего цикла лабораторного образца пневмоударного механизма при избыточном давлении в магистрали $p_{\text{маг}} = 0.6 \text{ МПа}$: *а* — внешний вид диаграмм давления и расхода сжатого воздуха в программе “Power Graph 3.3”, *б* — обработанные диаграммы давлений в виде графиков в период рабочего цикла ($p_1 - p_4$ — давление в камерах 1–4, p_5 — давление в магистрали); *в* — показания диаграммы мгновенного расхода сжатого воздуха в программе “Power Graph 3.3”; *г* — изменение мгновенного расхода сжатого воздуха Q ; *д* — изменение результирующей силы по времени в период цикла; *е* — перемещение ударника по времени в период цикла

На рис. 5 представлены диаграммы рабочего цикла лабораторного образца с массой ударника 18.5 кг: *а* — экспериментальные диаграммы, полученные на стенде, *б* — расчетные диаграммы, полученные на компьютерной модели [7]. Экспериментальные и компьютерные диаграммы схожи, они имеют общие характерные точки, одинаково качественно описывают рабочий процесс ударного устройства. Сравнение количественных показателей рабочего цикла лабораторного образца приведено в табл. 2. Основные параметры имеют расхождения в

пределах 9–33 %, экспериментальный удельный расход $16.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$, расчетный — $13.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$.

ТАБЛИЦА 1. Расчет показателей рабочего цикла на основе экспериментальных диаграмм давления в рабочих камерах сжатого воздуха $v_y = J_y / m$

Параметр	Формула	Числовые значения	Численный результат
Ударный импульс	$J_y = \frac{J \cdot t_c - J_1 \cdot t_{c1} - J_4(T - t_{c4})}{T}$	$\frac{142.8 \cdot 0.1018 - 43.5 \cdot 0.016 - 1.5(0.156 - 0.0036)}{0.156}$	87.2 кН · с
Скорость удара	$v_y = J_y / m$	87.2 / 18.5	4.72 м/с
Энергия удара	$A_y = \frac{J_y^2}{2m}$	$87.2^2 / (2 \cdot 18.5)$	206 Дж
Частота ударов	$f = 1/T$	1 / 0.156	6.41 Гц
Удельный расход	$q = Q / (60 A f)$	$1.3 / (60 \cdot 216 \cdot 6.41)$	$16.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$

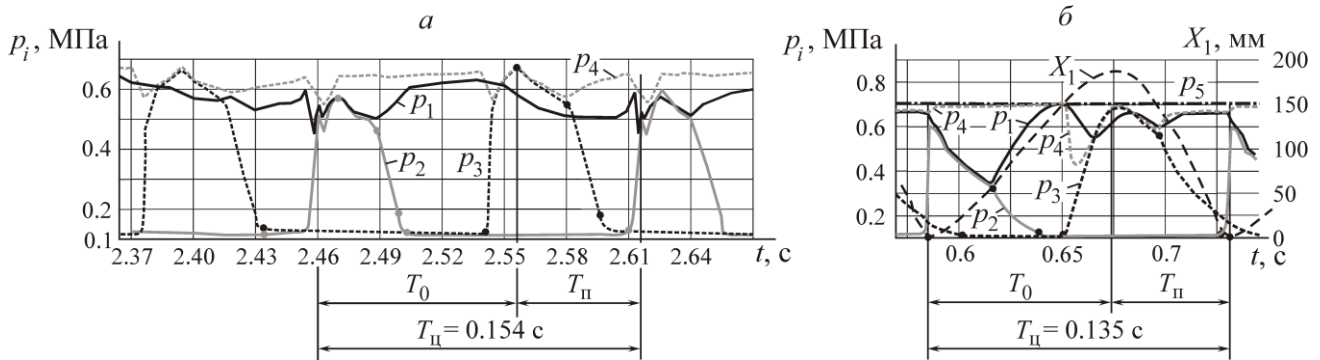


Рис. 5. Диаграммы рабочего цикла нового пневмоударного механизма с массой ударника 18.2 кг: *a* — экспериментальные (физическая модель); *б* — расчетные (компьютерная модель)

ТАБЛИЦА 2. Сравнение экспериментальных и расчетных показателей рабочего цикла лабораторного образца

Показатели	Физическое моделирование	Имитационное моделирование	Отклонение, %
Давление избыточное в магистрали на выходе из компрессора p , МПа	0.60	0.60	—
Среднее избыточное давление в магистрали на входе в устройство p_m , МПа	0.55	0.60	+9
Период цикла $T_{ц}$, с	0.156	0.135	-11
Скорость удара v , м/с	4.71	5.5	+13.2
Энергия удара A , Дж	206	275	+33.4
Частота ударов n , Гц	6.41	7.4	+15.4
Абсолютный расход Q , м ³ /мин	1.30	1.67	+28.4
Удельный расход q , м ³ /Дж	$16.4 \cdot 10^{-6}$	$13.6 \cdot 10^{-6}$	-17.1

ВЫВОДЫ

Лабораторный образец пневмоударного устройства, имеющего две управляемые камеры, три камеры постоянной подачи сжатого воздуха, два упругих клапана на ударнике и два пластинчатых клапана отсечки, показал стабильную работу в диапазоне давлений 0.5–0.7 МПа. Рабочий цикл нового пневмоударного устройства обеспечивает значительное снижение (в 1.7–2.7 раза) удельного расхода сжатого воздуха по сравнению с известными моделями погружных пневмоударников. Это достигается за счет того, что, во-первых, в устройстве увеличена средняя скорость перемещения ударника при прямом и обратном ходе, так как в его рабочем цикле исключены давление в камере обратного хода при прямом ходе ударника и давление в управляемой камере прямого хода при обратном ходе ударника до начала взаимодействия ударника с клапаном отсечки. Во-вторых, сжатый воздух в камере обратного хода и в управляемой камере прямого хода в соответствующие периоды работает на расширение, в момент перед началом выхлопа действует низкое избыточное давление (до 0.1 МПа). По результатам экспериментальных исследований установлено значение удельного расхода сжатого воздуха — $16.4 \cdot 10^{-6}$ м³/Дж.

Новое пневмоударное устройство можно использовать в качестве основы для разработки прототипа погружного пневмоударника для бурения крепких горных пород со сниженным удельным расходом сжатого воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Пневмоударник М48.** Технические характеристики. АсГАРД [Электронный ресурс]. – Режим доступа. <https://www.as-gard.ru/production/9/view/357>, (12.03.2018).
2. **A. s. 112867 SSSR.** Drill hammer, A. A. Zinov'yev, L. I. Semenov, Byull. Izobret., 1958. [А. с. 112867 СССР. Бурильный молоток / А. А. Зиновьев, Л. И. Семенов // Оpubл. в БИ. — 1958.]
3. **Gaun V. A.** Some ways to improve the efficiency of DTH hammers, Pneumatic drilling machines: collection of scientific papers, Novosibirsk, 1984. [Гаун В. А. Некоторые направления повышения эффективности погружных пневмоударников / Пневматические буровые машины: сб. науч. трудов. — Новосибирск, 1984.]
4. **Pat. 2252996 RF.** Down-the-hole hammer, A. A. Lipin, A.V. Belousov, N. N. Zabolotskaya, Byull. Izobret., 2005, no. 15. [Пат. 2252996 РФ. Погружной пневмоударник / А. А. Липин, А. В. Белоусов, Н. Н. Заболоцкая // Оpubл. в БИ. — 2005. — № 15.]
5. **Lipin A. A., Kharlamov Yu. P., and Timonin V. V.** Circulation system of a pneumatic drill with central drilling mud removal, Journal of Mining Science, 2013, no. 2, pp. 248–253. [Липин А. А., Харламов Ю. П., Тимонин В. В. Исследование циркуляционной системы пневмоударника с центральным шламоторанспортом // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 91–99.]
6. **Lipin A. A.** Promising pneumatic punchers for borehole drilling, Journal of Mining Science, 2005, no. 2, pp. 157–161. [Липин А. А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ. — 2005. — № 2 — С. 74–78.]
7. **Tambovtsev P. N.** Effective operating cycle of a pneumatic punch machine, Interexpo Geo-Siberia, XIV International Scientific Congress, collection of materials, 2018, vol. 6, pp. 197–206 [Тамбовцев П. Н. Эффективный рабочий цикл пневмоударной машины // Интерэкспо Гео-Сибирь: сб. трудов XIV Междунар. науч. Конгресс. — 2018. — Т. 6. — С. 197–206.]
8. **Esin N. N.** Research methodology and refinement of pneumatic hammers, Novosibirsk, 1965, 76 pp. [Есин Н. Н. Методика исследования и доводки пневматических молотков. — Новосибирск, 1965. — 76 с.]