



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРУЖЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ В ГРУНТОВЫЙ
МАССИВ ПНЕВМОМОЛОТОМ С РАЗДЕЛЕННЫМ УДАРНИКОМ**

В. В. Червов, И. В. Тищенко

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

Экспериментально изучена работа устройства с двумя подвижными ударными массами, действующими в едином корпусе для виброударного погружения стальных труб в упругопластическую грунтовую среду. Изготовлен и испытан лабораторный образец пневмомолота с составной ударной частью, выполненный на основе воздухораспределительной схемы с упругим клапаном в камере обратного хода ударника. Приведены результаты исследования рабочего цикла при различных типах настройки. Получены предварительные сведения о возможности влияния ударов на продолжительность и периодичность силового импульсного воздействия.

Пневматический молот, расход воздуха, удар, частота, масса, энергия удара, труба

**EXPERIMENTAL STUDY OF PIPES INDENTION IN SOIL UNDER THE ACTION OF
AIR-DRIVEN HAMMER WITH TWO-MASS PISTON**

V. V. Chervov and I. V. Tishchenko

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

The experiments were carried out to study a system with two mobile percussion masses incorporated in a common housing for steel pipes penetration into elastic-plastic environment under the action of vibro-pecrcussion. A laboratory sample of a pneumatic hammer with the pipe driving unit based on the air distribution scheme with an elastic valve in the pressurized chamber for return-stroke of the piston was fabricated and tested. The results of the study of the working cycle for different types of settings are given. Preliminary data on the possible effects of percussion actions on the duration and frequency of impact impulses are obtained.

Pneumatic hammer, air consumption, impact, frequency, mass, impact energy, pipe

Большой объем технологических работ горнодобывающего сектора, занимающегося разведкой и разработкой месторождений твердых полезных ископаемых, выполняется с использованием установок импульсного действия в виде разнообразных по конструкции и назначению станков ударного и ударно-вращательного бурения, перфораторов, отбойных молотков и навесных устройств с периодическим циклом нагружения [1]. В строительной отрасли при проведении специальных работ применяются технологии, связанные с пластической деформацией грунтового массива, с образованием выработок и подземных каналов, с погружением различных конструктивных элементов и профилей [2].

Рекомендации по оптимизации параметров и дальнейшему совершенствованию конструкции импульсных установок, созданию энергосберегающих машин с повышенными функциональными возможностями основаны на опыте практической эксплуатации и результатах научных исследований формирования и распространения волн деформаций в ударных систе-

мах при различных условиях соударения и взаимодействия с обрабатываемой средой [3]. Альтернативное направление развития импульсных машин — создание нового класса многомассовых ударных механизмов, в основе которых используется эффект интенсификации передачи энергии удара при центральном повторяющемся соударении твердых тел через промежуточный упругий элемент, получившее название “явление дребезга” [4]. Дополнительные силовые импульсы вызывают сопутствующее ослабление породы в зоне контакта и дают приращение скорости бурения до 20 % [5].

Результаты выполненных в ИГД СО РАН исследований подтвердили перспективность создания устройств с расширенным частотным диапазоном ударного воздействия при условии обеспечения требуемого порогового значения энергии единичного удара, необходимого для преодоления сопротивления породного массива [6]. При некоторой частоте колебаний коэффициент внутреннего трения способен уменьшаться настолько, что грунты приобретают свойства вязкой жидкости и резко теряют свою несущую способность. Высокие показатели достигаются при повышенной частоте, обеспечивающей приемлемую для практики скорость процесса внедрения [7]. Опираясь на полученные данные, разработан и исследован опытно-промышленный образец с энергией единичного удара 1.4 кДж при частотной составляющей ударной мощности на уровне 9 Гц [8].

Соосное соединение нескольких источников импульсной нагрузки в комбинированный модуль выполнено на модели, сформированной из двух устройств с массами ударников 1 и 2 кг, энергиями 9 и 17 Дж и частотами 13.5 и 6.4 Гц соответственно при погружении трубы диаметром 33 мм в плотный супесчаный грунт влажностью не более 10 % [9]. При несинхронной работе этих устройств был получен явный нелинейный рост скорости проходки скважины по сравнению с ожидаемым ростом от простого сложения ударных мощностей, который достигал 10–80 %. Для синхронизации двух генераторов ударных импульсов разработана система плавной регулировки частоты ударного воздействия [10].

Дальнейшее повышение эффективности применения импульсных машин для горного дела и строительного производства не должно ограничиваться простым ростом энергопотребления технологического процесса. Это повышение может быть достигнуто в устройстве с единым энергетическим трактом и двумя ударниками в одном корпусе, которые поочередно, с разными временными интервалами, наносят удары по наковальне.

Клапанная схема воздухораспределения, заложенная в пневмомолотах “Тайфун”, позволяет создавать устройства с переменной структурой ударной мощности в широком спектре массогабаритных показателей, начиная от лабораторных моделей с массами ударников 0.5–8.0 кг и заканчивая промышленными образцами с массами ударников 40–1000 кг и энергией единичного удара от 0.4 до 8.5 кДж.

На основе функциональной схемы пневмомолота “Тайфун” разработана конструкция гибридного импульсного механизма (рис. 1). Она включает рабочие камеры прямого A_1 и обратного A_2 перемещения подвижных масс m_1 и m_2 при отработке в них поступающего из подающей магистрали объема сжатого воздуха под давлением p_0 . Величина рабочего хода задается расстоянием X_0 от точки переднего замыкания кольцевого упругого клапана 1 до начальной кромки выхлопных пазов 2. Связь между камерами осуществляется через канал 3, в начале которого установлен сменный жиклер 4. Изменением размера d жиклера 4 регулируется скорость проходящего по каналу 3 воздушного потока и интенсивность наполнения полости A_2 , что напрямую влияет на время обратного хода ударной массы, продолжительность рабочего цикла и частоту ударов.

Главное в новом устройстве — разделение общей ударной массы на две составляющие части: центральную m_1 и периферийную m_2 , имеющие возможность свободного перемещения относительно друг друга. Величина первоначального выступа x передней торцевой поверх-

ности оказывает прямое влияние на разность временных фаз формируемой пары ударных импульсов за один рабочий цикл машины и зависит от толщины дистанционного элемента 5 из набора сменных металлических колец.

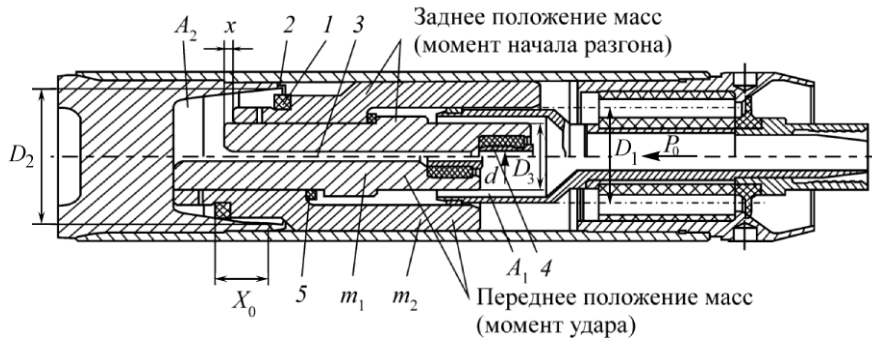


Рис. 1. Функциональная схема пневмомолота с разделенным ударником: A_1, A_2 — камеры прямого и обратного хода; m_1, m_2 — ударные массы; X_0 — рабочий ход; x — смещение центральной части; 1 — упругий клапан; 2 — выхлопной паз; 3 — канал; 4 — жиклер; 5 — дистанционное кольцо

Совместное синхронное перемещение двух масс на стадии разгона без отрыва их контактирующих поверхностей в месте образования упора (правое положение на рис. 1) обеспечено правильным подбором рабочих площадей со стороны камеры прямого хода, определяемого соотношением диаметральных размеров:

$$D_3 \geq \sqrt{\frac{D_1^2 + d^2}{2}}. \quad (1)$$

Кинетическая энергия, приобретаемая каждой массой, определяется по зависимостям:

$$E_1 = \frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{\pi(X_0 - x)\psi}{4} \left(p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) (D_3^2 - d^2), \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{\pi X_0 \psi}{4} \left(p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) (D_1^2 - D_3^2), \quad (3)$$

где V_1, V_2 — предударные скорости, м/с; X_0 — расчетный ход до начала выхлопа, м; ψ — коэффициент заброса ударника; p_0 — входное магистральное давление энергоносителя, МПа; Δp_1 — максимальное падение давления в камере прямого хода, МПа.

Одинаковый характер движения двух тел на этапе разгона $V_1 = V_2$ позволяет определить суммарное значение энергетической составляющей ударной мощности:

$$\sum E = E_1 + E_2 = \frac{(m_1 + m_2)V^2}{2} = \frac{\pi X_0 \psi}{4} \left(p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) (D_1^2 - d^2). \quad (4)$$

С учетом общих рекомендаций, выработанных при проектировании всех пневмомолотов типа “Тайфун” с упругим кольцевым воздухораспределительным элементом, специфических особенностей, свойственных новому устройству ударного действия, а также при условии обеспечения требуемого соотношения диаметральных размеров (1), разработан и изготовлен экспериментальный образец механизма с разделенным ударником.

Разделенный ударник общей массой 9 кг состоит из двух деталей: центрального лидера с $m_1 = 3$ кг и внешнего поршня с $m_2 = 6$ кг. Такое соотношение масс вытекает из необходимости вписать элементы в заданный конструктивный объем и для выполнения условия (1). Протяженность рабочего хода до начала выхлопа составляет $X_0 = 33$ мм. Предварительное опережающее смещение лидирующей носовой части имеет дискретную настройку в диапазоне значений $x = 0 - 10$ мм. Регулирование частоты ударов на трех уровнях достигается изменением сечения сменных жиклеров с отверстием $d = 4, 6, 8$ мм.

Первый этап исследования экспериментального образца выполнялся на вертикальном испытательном стенде. В рабочие камеры машины устанавливались датчики марки P8AP фирмы HBM (Германия). Запись индикаторных диаграмм давлений, отображающих изменение данного параметра в течение каждого рабочего цикла машины, осуществлялась с помощью типового набора лабораторного измерительно-регистрирующего оборудования.

Эксперименты доказали правильность теоретических предположений и подтвердили работоспособность созданной модели пневмоударного механизма с разделенным ударником. Полученные зависимости изменения давлений в рабочих камерах машины (рис. 2) имеют типичные особенности, свойственные всем пневмомолотам “Тайфун” с клапанной системой воздухораспределения. Работа импульсного механизма носит устойчивый характер на всех режимах его настройки. Установка одного из сменных жиклеров вызывает уменьшение периода рабочего цикла с $T=0.096$ с при $d=4$ мм (рис. 2б) до $T=0.06$ с при $d=6$ мм (рис. 2а) и $T=0.054$ с при $d=8$ мм (рис. 2в) и сопровождается соответствующим изменением частотной компоненты в пределах $f=0.4, 16.8, 18.5$ Гц. Степень регулирования частоты ударов составила 1.8 раза, что также соответствует устройствам данного типа. Аналогичная качественная и количественная картина наблюдалась во всем исследуемом диапазоне ($x=0-10$ мм) опережающего смещения центрального лидера m_1 относительно внешнего поршня m_2 и не зависела от его настройки.

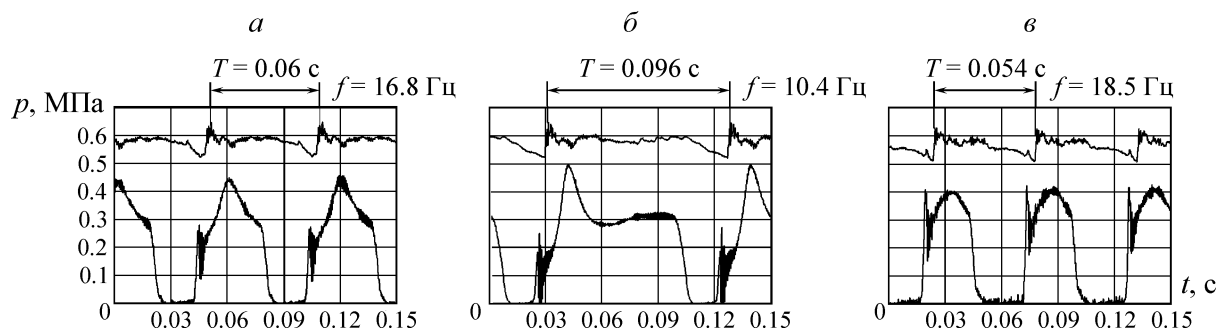


Рис. 2. Индикаторные диаграммы рабочего цикла машины при различных диаметрах жиклера, мм: а — 6; б — 4; в — 8

На втором этапе исследований моделировался процесс погружения стального элемента в грунт под действием импульсной нагрузки, сформированной устройством с разделенным ударником. В ходе его проведения фиксировался характер ударно-волнового процесса, протекающего в теле внедрения. Для этого использовался тензометрический датчик Д (рис. 3), сконструированный согласно требованиям к измерительным приборам данного типа [11, 12].

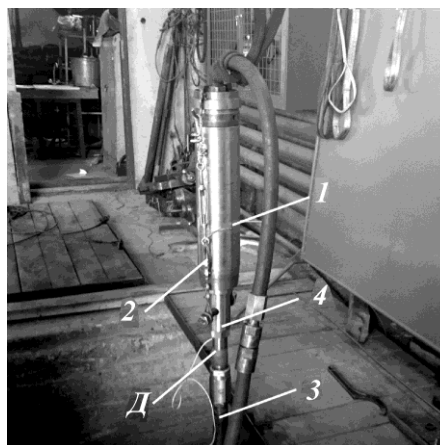


Рис. 3. Машина с разделенным ударником на трубе: 1 — пневмомолот; 2 — стяжное приспособление; 3 — погружаемый профиль; 4 — переходник; Д — датчик силы

Аналоговый электрический сигнал поступал в блок усилителей, обрабатывался на аналого-цифровом преобразователе и принимался входным портом USB компьютера. Предварительная калибровка регистрирующего канала в единицах силы осуществлялась по образцовому манометру класса 04 с помощью гидравлического пресса, приводимого в действие ручным насосом. Полученные данные записывались и обрабатывались стандартным пакетом программ Power Graph Professional и Excel.

Механическая часть экспериментальной установки включала модель пневмомолота 1 (рис. 3), стяжное приспособление 2 для надежной фиксации устройства на погружаемом стержне 3 посредством переходного элемента 4. Телом внедрения в грунт служила трубчатая плеть с наружным диаметром 50 мм и длиной 4 м. Головная часть трубы, непосредственно взаимодействующая с забоем, имела конический наконечник с углом при вершине 60° . Тензометрический датчик D встраивался между переходником и погружаемым стержнем с помощью резьбовых соединений с контргайками. Грунтовая среда, начиная с глубины 1.5 м, представляла собой плотную супесчаную смесь естественного залегания с нормальной влажностью на уровне 10–12 %.

Длина участка внедрения трубной плети для каждого варианта режима настройки ударного механизма составляла 0.2 м, после прохождения которого процесс останавливался для внесения необходимых регулировок. При этом опережающее смещение центрального лидера изменялось ступенчато путем установки соответствующего металлического дистанционного кольца и составляло: $x = 0, 1, 2, 4, 5$ и 10 мм (рис. 1). Измерения начинались с отметки 1.5 м и заканчивались на глубине 3.5 м. Количество пройденных в ходе эксперимента скважин соответствовало числу настроек частотной компоненты модели: $f = 10.4, 16.8, 18.5$ Гц. Процесс внедрения фиксировался на видеокамеру марки SONY HDR-TD20E для последующего анализа.

Полученные данные (рис. 4) подтвердили возможность внесения структурных изменений в характер периодического импульсного воздействия, генерируемого устройством с составным ударником. На диаграммах силовых импульсов четко прослеживается тенденция появления и сочетания двух волновых процессов, возникающих в погружаемом элементе в результате передачи ему накопленной кинетической энергии сначала от центрального лидера с $m_1 = 3$ кг (опережающий пик), а затем от внешней поршневой ударной части с $m_2 = 6$ кг (последующий пик). Причем задержка нарастания фронта второй основной ударной волны относительно первой изменяется ступенчато от минимума $\delta = 0$ при одновременном ударе и отсутствии переднего смещения: $x = 0$ (рис. 4а) до максимума $\delta = 0.0037$ с при $x = 10$ мм (рис. 4е).

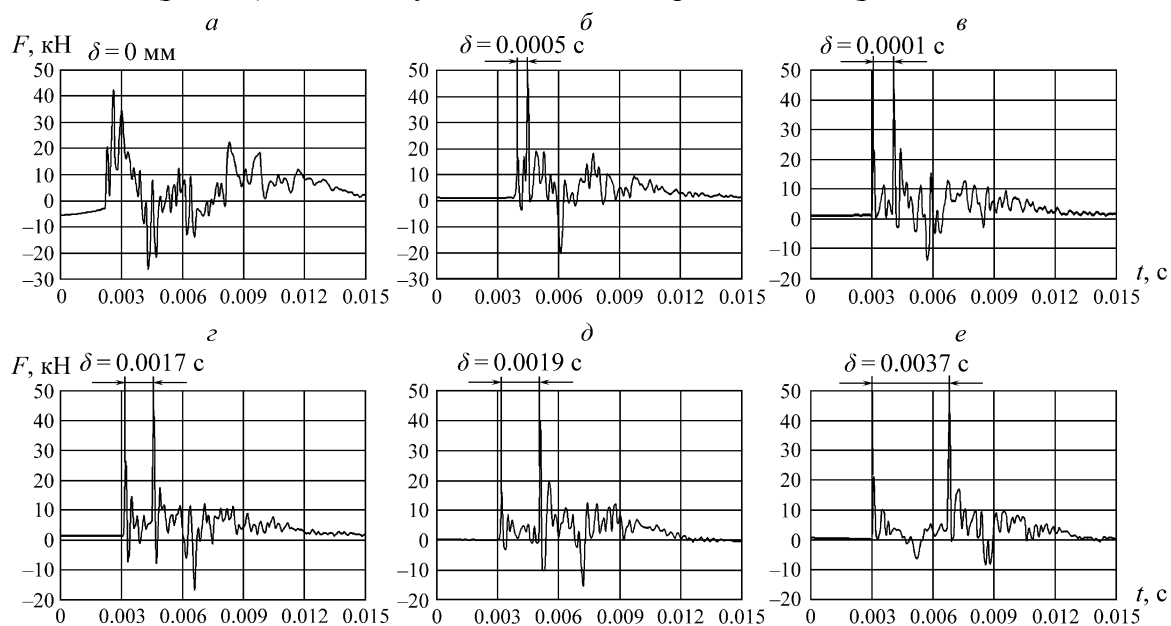


Рис. 4. Диаграммы силовых импульсов пневмомолота с разделенным ударником в трубной плети диаметром 50 мм при различных способах настройки, мм: а — 0; б — 1; в — 2; г — 4; д — 5; е — 10

Указанные и промежуточные значения временного показателя $\delta = 0.0005, 0.0010, 0.0017, 0.0019$ с (рис. 4б–д) коррелируют с характером пошагового изменения линейного параметра $x = 0, 1, 2, 4, 5, 10$ мм, определяющего исходное взаимное положение передних торцевых поверхностей подвижных ударных масс. Из представленных числовых рядов видно, что значения их относительного приращения при последовательном переходе от текущего уровня к следующему практически идентичны: $\Delta_i = \delta_{i+1} / \delta_i \approx x_{i+1} / x_i$.

Амплитудные значения ударных импульсов не зависят от режима настройки модели и лежат в пределах: $F_{\max 1} = 20–23$ кН для первой волны и $F_{\max 2} = 40–42$ кН — для второй. Такая двукратная разница обусловлена аналогичным сочетанием масс формирующих их соударяющихся тел: $m_1 = 3$ кг и $m_2 = 6$ кг и приобретаемых ими значений кинетической энергии до момента удара (зависимости (2)–(4)): $F_{\max 1} / F_{\max 2} = m_1 / m_2 = E_1 / E_2 = 0.5$. Представленные тенденции свойственны всему исследованному частотному интервалу рабочего цикла экспериментальной модели и не зависят от диаметра сменного жиклера.

Двойное импульсное воздействие на объект при каждом цикле нагружения приводит к активизации разрушения внутренних связей. При этом первая волна меньшей амплитуды генерирует колебательный волновой процесс в погружаемом элементе, вызывает предварительное разупрочнение породы в зоне контакта с инструментом и создает условия для большего продвижения от последующего ударного импульса. Это способствует уменьшению лобового и бокового сопротивления среды и увеличению скорости внедрения стержня. Для более глубокого и всестороннего изучения практических возможностей пневматического импульсного механизма с разделенным ударником планируется новый цикл экспериментальных исследований.

ВЫВОДЫ

Создана экспериментальная модель механизма с изменяемой частотой удара, главным отличием которого является разделенный ударник. Переднее смещение центральной ударной части относительно периферической имеет дискретную настройку.

Установлен повторяющийся характер периодического импульсного воздействия, который зависит от стабильной последовательности двух взаимно налагаемых волновых процессов. Найдено постоянное соотношение между амплитудами ударов, которое определяется величинами масс каждой из частей составного ударника. Разность временных фаз между передними фронтальными линиями первой и второй ударных волн характеризуется ступенчатым линейным нарастанием при дискретном изменении переднего смещения центральной ударной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Paderni R. Yu.** Mining machines and complexes for open works, Moscow, Moscow state mining University, 2001, 332 pp. [**Подэрни Р. Ю.** Горные машины и комплексы для открытых работ. — М.: МГГУ, 2001. — 332 с.]
2. **Kyun G., Schauble, and L., Schlick H.** Closed laying of impassable pipelines, Moscow, Stroyizdat, 1993, 168 pp. [**Кюн Г., Шойбле Л., Шлик Х.** Закрытая прокладка непроходных трубопроводов. — М.: Стройиздат, 1993. — 168 с.]
3. **Alimov O. D., Manzhosov V. K., and Yeremyants V. E.** Impact. Propagation of deformation waves in shock systems, Moscow, Nauka, 1985, 358 pp. [**Алимов О. Д., Манжосов В. К., Еремьянц В. Э.** Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. — М.: Наука, 1985. — 358 с.]
4. **Scientific discovery A-415.** The phenomenon of intensification of the impact energy transfer in the Central repeated collision of solids through an intermediate elastic element, R. F. Nagaev, D. A. Yungmeister, Y. V. Zudenkov, L. K. Gorshkov, V. A. Pivnev, V. S. Svinin, Byull. Izobret., 2007, no. 332 [**Научное открытие А-415.** Явление интенсификации передачи энергии удара при центральном повторяющемся соударении твердых тел через промежуточный упругий элемент / Р. Ф. Нагаев, Д. А. Юнгмейстер, Ю. В. Судьенков, Л. К. Горшков, В. А. Пивнев, В. С. Свинин // Опубл. в БИ. — 2007. — № 332.]

5. **Yungmeister D. A., Pevnev V. A., and Zudenzov Y. V.** Experimental studies of pneumatic perforators (shock systems) with a two-mass piston-striker, *Hydraulics and Pneumatics*, 2004, no. 13, 14, pp. 17–20 [Юнгмейстер Д. А., Пивнев В. А., Судьенков Ю. В. Экспериментальные исследования пневматических перфораторов (ударных систем) с двухмассовым поршнем-ударником // Гидравлика и пневматика. — 2004. — № 13, 14. — С. 17–20.]
6. **Chervov V. V., Tishchenko I. V., and Smolyanitsky B. N.** Influence of vibration impact frequency and additional static force on the speed of rod immersion into the ground, *Journal of Mining Science*, 2011, no. 1, pp. 61–70 [Червов В. В., Тищенко И. В., Смоляницкий Б. Н. Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержня в грунт // ФТПРПИ. — 2011. — № 1. — С. 61–70.]
7. **Verstov V. V. and Gaydo A. N.** Comparative analysis of the effectiveness of penetration of a steel pile in dense soil, *Mechanization of construction*, 2013, no. 2, pp. 44–49 [Верстов В. В., Гайдо А. Н. Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт // Механизация строительства. — 2013. — № 2. — С. 44–49.]
8. **Tishchenko I. V.** Pneumatic hammer with increased frequency of impact, *Westn. KuzGTU*, 2014, no. 3, pp. 12–16 [Тищенко И. В. Пневмомолот с повышенной частотой ударного воздействия // Вестник КузГТУ. — 2014. — № 3. — С. 12–16.]
9. **Tishchenko I. V., Chervov V. V., and Gorelov A. I.** Effect of additional vibration exciter and the combination of vibro-impact devices on the speed of introduction of the pipe into the soil while puncturing // *Journal of Mining Science*, 2013, no. 3, pp. 107–118 [Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 107–118.]
10. **Pat. 2535426 RF.** The device of shock action / A. I. Gorelov, V. V. Chervov, *Byull. Izobret.*, 2014, no. 34. [Пат. 2535426 РФ. Устройство ударного действия / А. И. Горелов, В. В. Червов // Опубл. в БИ. — 2014. — № 34.]
11. **Makarov R. A., Renske A. B., and Borkoski G. H.** Strain measurement in mechanical engineering, Moscow, Mechanical Engineering, 1975, 288 pp. [Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х. Тензометрия в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1975. — 288 с.]
12. **Robert G.** Measuring transducers of non-electrical quantities, Moscow, Energy, 1970, 360 pp. [Нуберт Г. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. — М.: Энергия, 1970. — 360 с.]