



**ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН  
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

**Ю. В. Ваняг<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
E-mail: yuliya.vanag@corp.nstu.ru, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия*  
<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Обоснована актуальность применения пневматических машин ударного действия в условиях ограниченного технологического пространства. Приведены примеры производства работ по забиванию труб в грунт с использованием малогабаритных пневмоударных машин. Представлены результаты физического моделирования процесса виброударного погружения вертикальных труб различного диаметра. Доказана эффективность использования экспериментального образца пневмоударной машины с двумя управляемыми камерами для погружения труб в грунт.

*Ограниченное технологическое пространство, пневматическая машина ударного действия, частота ударов, энергия ударов, виброударный прокол, виброударное продавливание*

**APPLICATION OF PNEUMATIC MACHINES  
IN CONDITIONS OF A CONFINED TECHNOLOGICAL SPACE**

**Yu. V. Vanag<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, E-mail: yuliya.vanag@corp.nstu.ru,  
pr. K. Marks 20, Novosibirsk 630073, Russia*  
<sup>2</sup>*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The relevance of using pneumatic impact machines in conditions of confined technological space is justified. Examples of pipe driving into soil by means of small-sized pneumatic impact machines are presented. Vibratory percussive penetration of vertical pipes with different diameter was physically simulated, the results are presented. The effectiveness of using an experimental model of pneumatic impact machine with two controllable chambers for driving pipes in soil is proved.

*Confined technological space, pneumatic impact machine, impact frequency, impact energy, vibratory percussive penetration, vibratory percussive pushing*

Увеличение мощностей действующих предприятий горнодобывающей и перерабатывающей отраслей, а также освоение новых труднодоступных месторождений полезных ископаемых в условиях ужесточения экологических требований [1] вызывает необходимость совершенствования и развития технических средств и технологий, обеспечивающих сооружение подземных выработок и объектов инфраструктуры при максимальной сохранности существующего природного ландшафта и уменьшении загрязнения окружающей природной среды продуктами горного производства и строительства. При добыче руд черных и цветных металлов, строительных материалов, в транспортном строительстве, геологической разведке, строительстве гидротехнических сооружений широко применяется пневмоударное бурение [2, 3]. К числу достоинств этого способа бурения относятся сравнительно небольшая масса машин, простота их

конструкции и обслуживания, высокая надежность в эксплуатации. Несмотря на низкий КПД пневматических машин ударного действия, пневмоударное бурение в большинстве случаев оказалось экономически эффективно, что объясняет растущий интерес к буровым машинам с пневматическим приводом.

Для производства строительных работ с применением пневмоударных машин наиболее распространенными являются способы [4–7]: *прокол* [8], который реализуется путем погружения в грунт стальных труб (вертикально, под углом и горизонтально) с закрытым торцом диаметром до 0.065 м и длиной до 15 м или стандартных профилей малого поперечного сечения, которые используются в качестве электродов заземления, зондов, анкеров и элементов крепления откосов; *продавливание* [9] осуществляется посредством забивания трубы открытым торцом с извлечением из нее грунта самодвижущимся устройством, имеющим пневмоударный привод, *комбинированный* способ [10], реализуемый с помощью бурильного устройства с пневмоударным приводом [11].

При выполнении строительных работ на территории предприятий большую роль играют факторы, касающиеся их организации. К ним относятся [12]:

- совмещение во времени и в пространстве строительных процессов в районе застройки с функционированием размещаемого в них оборудования;
- стесненность строительной площадки и зоны производства работ;
- специфические условия, связанные с ограниченной возможностью механизации строительных процессов и необходимостью проведения специальных видов строительно-монтажных работ.

К специальным строительным [13] относятся работы, выполняемые в сложившейся застройке при возведении новых и реконструкции существующих зданий и сооружений на производственных площадях и вблизи автодорог. В таких случаях ограничение технологического пространства может быть вызвано, например, проведением работ внутри производственных помещений при их реконструкции (рис. 1а), при отсутствии грузоподъемных механизмов или небольшом радиусе их действия [14].



Рис. 1. Забивка трубчатых свай пневмоударными машинами: а — в стесненных условиях производственного помещения; б — ограждение колонны при локальной просадке грунта

Иногда при производстве работ возникают ситуации, связанные с локальной просадкой грунта (рис. 1б) и, как следствие, необходимостью его уплотнения вблизи существующих зданий и сооружений. В ряде случаев при прокладке труб под автодорогами или пешеходными путями необходимое для этого оборудование размещают в подвальных помещениях зданий, прилегающих к месту работ. При этом минимальные размеры подвальных и цокольных помещений регламентированы [15] и составляют по высоте 1.8 м, на участках протяженностью не более 1 м высота проходов равна 1.6 м.

Сложными, с точки зрения размеров технологического пространства, являются также проходческие работы по устройству инженерных коммуникаций различного назначения, например, подключение объектов к сети водоснабжения, прокладка кабелей и т. п. В таких случаях прокладка труб-кожухов выполняется из канализационных колодцев или коллектора, либо по направлению к канализационному колодцу. Внутренний диаметр рабочих камер, стеновых и опорных колец канализационных колодцев составляет 0.7–1.5 м [16, 17]. Размеры коллекторов приведены в своде правил [18].

В этой связи актуально создание эффективных пневматических машин ударного действия с малыми массогабаритными параметрами и экономичными расходными характеристиками, что соответствует специфике производства работ в ограниченном технологическом пространстве и позволяет использовать малогабаритные передвижные источники сжатого воздуха. Согласно нормам охраны труда [19] массу пневмоударной машины можно принять ориентировочно 15 кг.

Существуют пневмоударные машины как с беззолотниковой и бесклапанной системами воздухораспределения [20], так и с упругим клапаном в системе воздухораспределения [4]. Экспериментальные исследования подтвердили, что машины с малыми массогабаритными параметрами могут осуществлять забивку труб горизонтально [21] и вертикально [4]. Кроме того, уменьшение размеров машин приводит к росту частоты их ударных импульсов, что дает возможность сохранить производительность машин при снижении массы ударника.

Для создания машины была принята схема бесклапанного пневматического ударного механизма [9, 20] с двумя управляемыми камерами, осевым подводом сжатого воздуха и радиальным (боковым) его выхлопом. Достоинство такой схемы состоит в том, что в течение всего цикла под давлением находится полное поперечное сечение ударника. Это позволяет получить высокое значение предударной скорости и увеличенную среднюю скорость рабочего хода ударника, что уменьшает время обратного хода и повышает частоту ударов. В результате спроектирован и изготовлен образец пневмоударной машины, после определения технических характеристик которого выполнено физическое моделирование процесса виброударного погружения в грунт труб разного диаметра (рис. 2а). Внешний вид пневматической машины ударного действия с двумя управляемыми камерами представлен на рис. 2б, в.

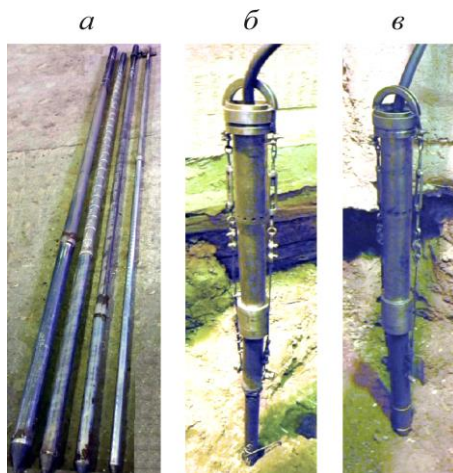


Рис. 2. Погружение труб различного диаметра экспериментальным образцом пневмоударной машины с двумя управляемыми камерами

Экспериментальные исследования проводились в вертикальном грунтовом канале, заполненном естественным супесчаным грунтом с влажностью 10–12%. После погружения до расчетной отметки (3 м) забитая труба извлекалась из грунта с помощью кран-балки грузоподъемностью 2 т. Затем начинался новый цикл подготовительных работ.

В ходе эксперимента осуществлялась видеосъемка, обработка материалов которой дала возможность получить качественную картину перемещения забиваемых труб и вычислить средние значения скорости погружения 0.1 м трубы. В результате построены зависимости скорости погружения труб от глубины внедрения (рис. 3). Видно, что для трубы диаметром 34 мм, у которой расширитель располагался на большей длине от погружаемого торца 1.6 м (рис. 3а), влияние сил бокового сопротивления нарастает с увеличением площади боковой поверхности контакта трубы с грунтом. Падение скорости забивания трубы при изменении площади боковой поверхности от 0.106 м<sup>2</sup> до максимального значения 0.176 м<sup>2</sup> на участке длиной 0.6 м достигло 0.018 м/с, при дальнейшем погружении трубы на такое же расстояние при максимальной и неизменной площади боковой поверхности 0.175 м падение скорости составило 0.0045 м/с.

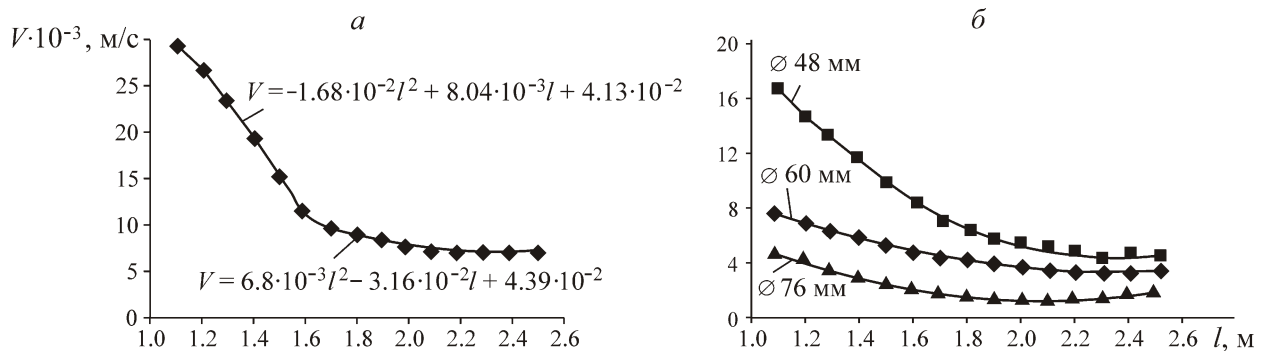


Рис. 3. Изменение скорости погружения трубы диаметром, мм: а — 34; б — 48, 60 и 76

Таким образом установлено, что рост сил бокового сопротивления существенно влияет на скорость забивания и глубину погружения трубы. Для повышения эффективности использования машины с двумя управляемыми камерами в технологии виброударного прокола и продавливания необходимо ограничивать величину бокового сопротивления грунта с помощью расширителя на передней части трубы. Изменения скорости по глубине для труб диаметром 48, 60 и 76 мм изображены на рис. 3б.

Методом наименьших квадратов получены выражения для определения скорости забивания трубы от глубины  $V = f(l)$  для труб диаметрами 48–76 мм:

$$V_{\varnothing 48} = 8.25 \cdot 10^{-3} l^2 - 3.83 \cdot 10^{-2} l + 4.88 \cdot 10^{-2},$$

$$V_{\varnothing 60} = 2.78 \cdot 10^{-3} l^2 - 1.3 \cdot 10^{-2} l + 1.86 \cdot 10^{-2},$$

$$V_{\varnothing 76} = 3.68 \cdot 10^{-3} l^2 - 1.52 \cdot 10^{-2} l + 1.69 \cdot 10^{-2}.$$

Скорость внедрения труб в исследуемом диапазоне размеров снижается с увеличением их диаметра. Одновременно по мере их погружения отмечается падение средней скорости для трубы диаметром 34 мм в 8.3 раза, 48 мм — в 8 раз, 60 мм — в 5.3 раза, 76 мм — в 5 раз. Рост скорости внедрения труб в диапазоне 2.3–2.9 м связан с изменением состава и свойств грунта. Значительное падение скорости погружения при достижении глубины 1.6–2.3 м объясняется тем, что с внедрением в грунт расширителя увеличивается сечение скважины.

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментов установлено, что при одних и тех же грунтовых условиях характер зависимостей скорости погружения труб пневмоударной машиной с двумя управляемыми камерами от глубины внедрения сохраняется. Во всех случаях наблюдается падение скорости погружения по мере внедрения в грунтовый массив, что обусловлено ростом давления грунта в массиве с увеличением глубины, при котором происходит обжатие трубы грунтом.

Полученные скоростные характеристики забивания труб различного диаметра свидетельствуют о том, что экспериментальный образец пневмоударного устройства с двумя управляемыми камерами обладает достаточным уровнем ударной мощности для преодоления сил сопротивления грунтового массива и может использоваться в качестве генератора ударных импульсов для погружения стальных элементов с помощью виброударного прокола в условиях ограниченного технологического пространства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Vasilchuk M. P. and Zimich V. S.** Subsoil and the main provisions of the ecological safety of their development, *Mining Journal*, 2013, no 7, pp. 17–21. [**Васильчук М. П., Зимич В. С.** Недра и основные положения экологической безопасности их освоения // *Горный журнал*. — 2013. — № 7. — С. 17–21.]
2. **Belyaev N. A.** Pneumatic impact well expanders, Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, USSR Academy of Sciences, 1987, 133 pp. [**Беляев Н. А.** Пневмоударные расширители скважин. — Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1987. — 133 с.]
3. **Timonin V. V., Kokoulin D. I., Alekseev S. E, and Kubanychbek V.** Straight directional drilling machines for coal mines, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 168–171. [**Тимонин В. В., Кокоулин Д. И., Алексеев С. Е, Кубанычбек В.** Средства прямолинейно направленного бурения в условиях угольных шахт // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 168–171.]
4. **Tishchenko I. V. and Chervov V. V.** Influence of energy parameters of shock pulse generator on the pipe penetration velocity in soil, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no 3, pp. 491–500. [**Тищенко И. В., Червов В. В.** Влияние энергетических параметров генераторов ударных импульсов на амплитуду и скорость внедрения трубы в грунт // *ФТПРПИ*. — 2014. — № 3. — С. 75–86.]
5. **Rybakov A. P.** Fundamentals of trenchless technologies (theory and practice) Moscow, Stroyizdat, 2006, 304 pp. [**Рыбаков А. П.** Основы бестраншейных технологий (теория и практика). — М.: Стройиздат. — 2006. — 304 с.]
6. **Kuhn G., Schaeuble L., and 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.]
7. **Khramenkov S. V., Primin O. G., and Orlov V. A.** Trenchless methods of restoration of water supply and drainage networks: textbook.help. for universities, Moscow, TIMR, 2000, 179 pp. [**Храменков С. В., Примин О. Г., Орлов В. А.** Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей: учеб.пособ. для вузов. — М.: ТИМР, 2000. — 179 с.]
8. **Abramenkov D. E., Abramenkov E. A., and Gruzin V. V.** Mechanic means of construction, reconstruction and restoration of buildings, structures: textbook, Novosibirsk, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2006, 319 pp. [**Абраменков Д. Э., Абраменков Э. А., Грузин В. В.** Средства механизации строительства, реконструкции и реставрации зданий, сооружений: учебник. — Новосибирск: НГАСУ, 2006. — 319 с.]
9. **Gileta V. P., Vanag Yu. V., Tishchenko I. V. Wedel P. M., and Volkov N. S.** Use of the small-sized pneumatic percussion mechanism, *Actual Problems in Machine Building*, 2015, no. 2, pp. 319–324. [**Гилета В. П., Ваняг Ю. В., Тищенко И. В. Ведель П. М., Волков Н. С.** Применение малогабаритно пневмоударного механизма // *Актуальные проблемы в машиностроении*. — 2015. — № 2. — С. 319–324.]
10. **Tishchenko I. V.** Vibro-impact punching and a combined method for cleaning pipes from ground core, *Construction and road vehicles*, 2013, no. 11, pp. 39. [**Тищенко И. В.** Виброударное продавливание и комбинированный способ очистки труб от грунтового керна // *Строительные и дорожные машины*. 2013. – № 11. — 39 с.]

11. **Balakhovsky M. S.** On the Russian market – the American firm “Vermeer”, *Mechanization of construction*, 2000, no. 10, pp. 2–7. [**Балаховский М. С.** На российском рынке – американская фирма “Vermeer” // *Механизация строительства*. — 2000. — № 10. — С. 2–7.]
12. **Chebanova S. A., Azarov A. V., and Bekker M. E.** Features and problems of organizational and technological solutions of construction in cramped conditions, *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Series: Civil Engineering and Architecture*, 2019, no. 4 (77), pp. 146–152. [**Чебанова С. А., Азаров А. В., Беккер М. Е.** Особенности и проблемы организационно-технологических решений строительства в стесненных условиях // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. — 2019. — № 4 (77). — С. 146–152.]
13. **Tishchenko I. V., Smolyanitskii B. N., and Gileta V. P.** Combined hole-making in soil by impact devices with an annular working organ, *Journal of Mining Science*, 2006, vol. 42, no. 6, pp. 600–609. [**Тищенко И. В., Смоляницкий Б. Н., Гилета В. П.** Комбинированная проходка скважин в грунте ударным устройством с кольцевым инструментом // *ФТПРПИ*. — 2006. — № 6. — С. 87–97.]
14. **Sedov D. S.** Straitedened factors of development in towns in the constraint conditions, *Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*, 2010, no. 4-1, pp. 171–174. [**Седов Д. С.** Факторы стесненности в условиях плотной городской застройки // *Вестник МГСУ*. — 2010. — № 4-1. — С. 171–174.]
15. **Set of rules 54.13330.2016.** Multicompartment residential buildings, Moscow, Standardform, 2017, 47 pp. [**СП 54.13330.2016.** Здания жилые многоквартирные. — М.: Стандартинформ, 2019. — 47 с.]
16. **GOST 8020-2016** Concrete and reinforced concrete structures for holes in sewage, water and gas supply pipelines. Specifications, Moscow, Standardform, 2017, 25 pp. [**ГОСТ 8020-2016.** Конструкции бетонные и железобетонные для колодцев канализационных, водопроводных и газопроводных сетей. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2017. — 25 с.]
17. **GOST ГОСТ 32972-2014.** Plastic manholes for sewerage and drainage systems. Specifications, Moscow, Standardform, 2019, 31 pp. [**ГОСТ 32972-2014.** Колодцы полимерные канализационные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019, 31 с.]
18. **Set of rules 265.1325800.2016.** Manifold for engineering networks, Moscow, Standardform, 2017, 52 pp. [**СП 265.1325800.2016.** Коллекторы коммуникационные. Правила проектирования и строительства. — М.: Стандартинформ, 2017. — 52 с.]
19. **Safety rules RO-45-009-2003.** Safety rules when working on linear structures of cable transmission lines, Moscow, CENTERMAG, 2020, 128 pp. [**ПОТ РО-45-009-2003.** Правила по охране труда при работах на линейных сооружениях кабельных линий передачи. — М.: ЦЕНТРМАГ, 2020. — 128 с.]
20. **Abramenkov E. A., Abramnikov D. E., Kirillov F. F., and Kutumov A. A.** Rod pneumatic mechanisms of impact machines: throttle, jet, gold-free, valveless, combined, Reference manual, Tomsk: publishing house of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2008, 435 pp. [**Абраменков Э. А., Абраменков Д. Э., Кириллов Ф. Ф., Кутумов А. А.** Штоковые пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные, комбинированные / *Справ. пособие* — Томск: изд-во ТГАСУ, 2008. — 435 с.]
21. **Smolyanitskii B. N., Tishchenko I. V., Chervov V. V., Gileta V. P., and Vanag Yu. V.** Sources for productivity gain in vibro-impact driving of steel elements in soil in special construction technologies, *Journal of Mining Science*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 490–496. [**Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В., Гилета В. П., Ваняг Ю. В.** Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // *ФТПРПИ*. — 2008. — № 5. — С. 72–80.]