

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПРОЦЕСС ПОГРУЖЕНИЯ ПОЛЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРУНТЫ**

*Александр Сергеевич Смоленцев*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 223, e-mail: smolencevas@yandex.ru

*Александр Юрьевич Примычкин*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории бурения и технологических импульсных машин, тел. (383)205-30-30, доп. 223, e-mail: 808@nn.ru

Работа носит экспериментальный характер и нацелена на развитие способа виброударного погружения стальных труб-кожухов при бестраншейном строительстве подземных коммуникаций. Основной идеей исследования является выявление закономерностей наполнения внутренней полости трубы грунтом при различных формах ударного импульса. Приведены теоретические зависимости влияния структуры энергии удара (формы ударного импульса) на эффективность продвижения полого стержневого элемента в породном массиве на разных стадиях его внедрения.

Для количественной оценки степени заполнения грунтом внутренней полости трубы использован безразмерный параметр - коэффициент заполнения. Показано влияние диаметра трубы на приращение длины грунтовогекерна для различных ударных машин с одинаковыми энергиями удара. Представлен стенд и методика проведения полевых испытаний в различных грунтовых условиях, а также интерпретация полученных данных и их сравнение с результатами, полученными ранее как авторами данной работы, так и зарубежными коллегами.

**Ключевые слова:** пневмомолот, труба, грунтовый керн, коэффициент заполнения.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT OF PERCUSSIVE PULSE FORM ON SINKING PROCESS OF HOLLOW ROD ELEMENTS INTO SOILS**

*Alexander S. Smolentsev*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Laboratory for Drilling and Technological Impulse-Forming Machines, phone: (383)205-30-30, extension 223, e-mail: smolencevas@yandex.ru

*Alexander Yu. Primichkin*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, Laboratory for Drilling and Technological Impulse-Forming Machines, phone: (383)205-30-30, extension 223, e-mail: 808@nn.ru

The work has experimental nature and it is aimed to development of vibro-percussion method of pipe-cover sinking during trenchless constructions of underground utilities. The main idea of the research is the determination of regularities of filling inner tube hollow by soil at different forms of percussive pulse. Theoretical dependences of impact of percussion energy

structure (form of percussion pulse) on efficiency of hollow rod element advance in the solid at different stages of insertion.

Dimensionless parameter – filling coefficient is used for quantitative evaluation of filling rate by soil. Influence of pipe diameter on incrementation of length of soil core-sample for different percussive machines with the same percussive energy is shown. Stand and method of field test operation at various soil condition and interpretation of obtained data and its comparison with previous results obtained by the authors of the work and foreign researchers are represented.

**Key words:** pneumatic hammer, pipe, soil core-sample, filling coefficient.

### *Введение*

При забивке трубы в грунтовый массив открытым концом во внутрь трубы поступает грунт. На начальном этапе погружения длина грунтовой пробки равна длине погруженной в грунт трубы. По мере погружения трубы отношение длины грунтовой пробки к длине забитой части трубы в зависимости от различных факторов может варьироваться [1]. На определенном этапе может случиться так, что грунтовая пробка настолько утрамбована в трубе, что исключает попадание новой порции грунта внутрь трубы [2-5]. В этом случае можно рассматривать такое погружение как забивку трубы с закрытым концом. При погружении в грунт труб открытым концом общее сопротивление грунта складывается из трения наружной поверхности трубы, внутреннего трения пробки, лобового сопротивления пробки и торцевого сопротивления кольцевого сечения трубы [6-8]. На рис. 1, *а* показана схема действия сил на трубу до её закупоривания грунтом, а на рис. 1, *б* – полностью забитая грунтом труба при отсутствии продвижения пробки.

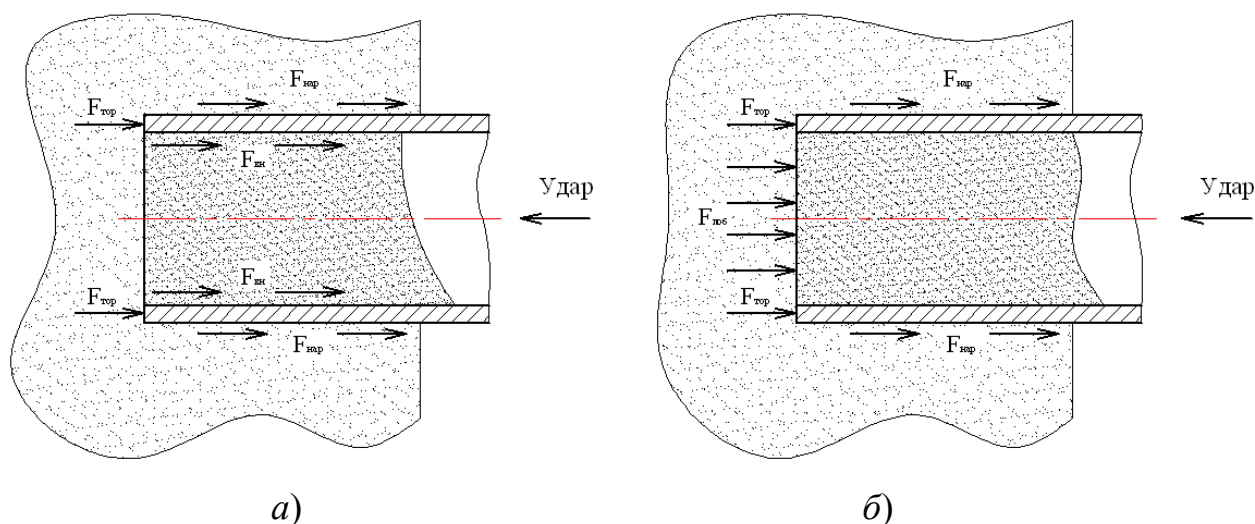


Рис. 1. Схема действия сил на трубу:

*а*) до её закупоривания (тампонирования) грунтом; *б*) полностью забитая грунтом труба при отсутствии продвижения пробки

## Теоретическая часть

Известно, что чем выше энергия ударного воздействия на трубу, тем на большую глубину мы можем погрузить трубу в грунтовый массив [9]. Однако, на энергию удара есть свои ограничения. Это прочность и продольная жесткость погружаемой трубы, а также увеличение стоимости механизмов ударного привода при желании получить большую энергию удара. При проектировании машин ударного действия желательно получить большую ударную мощность при минимизации массово-габаритных параметров. Структурно, ударная мощность является произведением энергии удара и частоты ударного воздействия. При этом повышать ударную мощность машин только за счет частоты ударов при реализации технологии погружения труб в грунтовый массив неверно. Необходимым условием продвижения трубы в грунте является достаточное для разрушения грунтового массива усилие на торце трубы. По мере увеличения глубины погружения трубы ударная волна, распространяясь по трубе, всё больше затухает из-за повышения сопротивления, как по наружной поверхности трубы, так и внутри неё вследствие роста грунтовой пробки. Поэтому очевидно, что без достаточной энергии удара погружение на большие глубины происходить не будет. На рис. 2 показаны два условных ударных импульса, энергия которых при прочих равных условиях одинакова. Это подтверждается расчетной формулой энергии волны напряжений [10]:

$$A = \frac{c}{E \cdot S} \cdot \int_0^T F_i^2(t) dt, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в металле;  $E$  – модуль упругости металла;  $S$  – площадь поперечного сечения волновода;  $T$  – длительность ударного импульса.

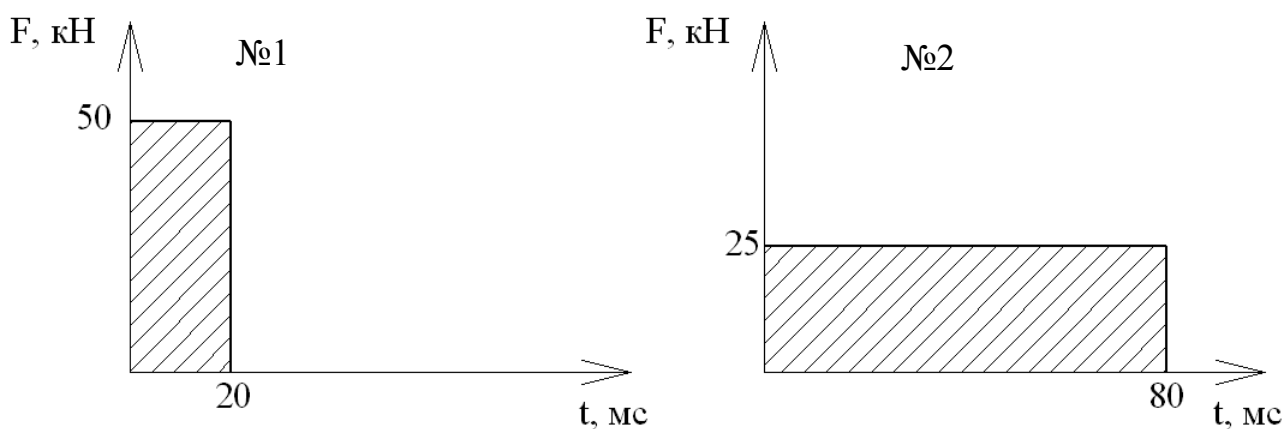


Рис. 2. Условные ударные импульсы

При этом и одна и та же энергия удара может выполнять полезную работу по-разному. На начальном этапе погружения трубы, когда сопротивления ещё минимальны, ударный импульс под номером 2 будет более эффективно (с большей скоростью) продвигать трубу. Это связано с тем, что сопротивления ещё не превышают 25 кН, а длительность импульса выше, значит и от каждого удара труба будет продолжительнее внедряться в грунт. Однако, как только сопротивления будут выше порогового значения в 25 кН, то под действием ударного импульса №2 погружение трубы происходить не будет. А вот ударный импульс с большей амплитудой (№1) позволит продолжить забивку трубы вследствие того, что на торец забиваемой трубы будут доходить волны напряжений с усилиями, достаточными для разрушения грунтового массива [11].

Амплитуда ударного импульса пропорциональна скорости ударного воздействия машины на трубу. Большинство машин ударного действия проектируются на скорость удара в диапазоне от 5 до 8 м/с. Дальнейшее увеличение скорости удара приводит к разрушению соударяемых деталей машины вследствие превышения в них допустимых напряжений [12-14].

### *Экспериментальные исследования*

Для реализации запланированных экспериментов по исследованию влияния структуры энергии удара на эффективность погружения трубы в грунт были изготовлены две пневматические ударные машины с равными по величине энергиями удара (разница не превышала 4%), но разными по массе ударниками и соответственно различными скоростями удара. Энергия машин составляла 9,3 Дж при массах ударника в 0,5 и 1 кг [15]. В отличие от копрового стенда для вертикального погружения труб, позволяющего в широком диапазоне изменять структуру энергии удара, в нашем случае при работе на производственных объектах и забивке труб горизонтально была возможность исследовать только два варианта исполнения машин ударного действия.

Ещё одной из задач стояло влияние свойств грунта на образование грунтовой пробки и эффективность погружения трубы. Эксперименты [16] показали, что соотношение глинистых частиц и песка влияет на процесс взаимодействия погружаемой трубы и песка. При выборе места проведения экспериментов было принято решение остановиться на полевых натуральных экспериментах, поскольку физическое моделирование грунтового массива не позволяет воссоздать природные связи между частицами грунта и получить однородный по физико-механическим свойствам массив. Всего было проведено две серии экспериментов по погружению в грунт трубы, одна из которых выполнялась на полигоне «Зеленая горка» Института горного дела, а вторая на строительном объекте г. Новосибирска в пос. Кольцово.

Интерес представляло исследование различных по свойствам грунтовых пород, а именно песчаных и глинистых. Грунт на полигоне ИГД СО РАН был исследован ранее по [17] и в составе имеет соотношение песчаных и глинистых частиц равное 20/80 и плотностью 1897 кг/м<sup>3</sup>. На втором объекте (пос. Кольцо-

во) грунт был песчаный. Лабораторный анализ грунта показал, что грунт на 85% состоит из песка с и плотностью  $1720 \text{ кг/м}^3$ . Уровень грунтовых вод находился на глубине ниже уровня проведения эксперимента.

На рис. 3 представлен общий вид установки динамического погружения трубы в грунт. Металлическое основание экспериментальной установки устанавливается на грунт и закрепляется анкерами для исключения его перемещений при выполнении опытов. На основании монтируется забиваемая труба, с которой через конический адаптер соединяется пневмоударная машина. Для возможности погружения труб различного диаметра адаптер выполнен с кольцевыми конусными канавками, в которых при ударах заклинивает труба. Для контроля глубины погружения трубы на основании смонтирован репер, а на наружной поверхности самой трубы выполнены кольцевых насечки каждые 10 мм для контроля глубины погружения. Внутри трубы вставлена заглушка, к которой присоединен тонкий пластиковый пруток. При погружении трубы данная заглушка перемещается поступающим внутрь трубы грунтом. Длина грунтовой пробки отслеживается с помощью измерительной шкалы, нанесенной на пруток. В питающей ударную машину пневмомагистрали установлен редуктор давления, позволяющий при необходимости работать машине на разных давлениях сжатого воздуха (от 0,3 до 0,7 МПа). Для извлечения забитой трубы используется механическая лебедка.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки при динамическом погружении трубы

Для исследования влияния диаметра погружаемой трубы на процесс образование грунтовой пробки были забиты в грунт три трубы с диаметрами 32, 48 и 76 мм. Забивка производилась отдельно каждой из машин (с ударником 0,5 кг машина №1, с ударником 1кг - №2). Измерение длины грунтового керна проводилось каждые 10 см погружения трубы.

### Результаты

Для количественной оценки степени заполнения грунтом внутренней полости трубы введен такой безразмерный параметр, как коэффициент заполнения  $\delta$ . Он показывает какую длину в погруженной в грунт трубе занимает грунтовая пробка и рассчитывается по формуле [18]:

$$\delta = \frac{l_{np}}{L_{mp}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

где  $l_{np}$  – длина грунтовой пробки, м;  $L_{mp}$  – длина трубы, погруженной в грунтовой массив, м.

Если грунт прекращает поступать в трубу (аналогично забивке трубы с закрытым концом), то  $\delta = 0$ .

На рис. 4 показаны кривые приращения длины пробки при различных диаметрах забиваемых труб. Приращения замерены на глубине погружения равной 1 метр в песок и суглинок.

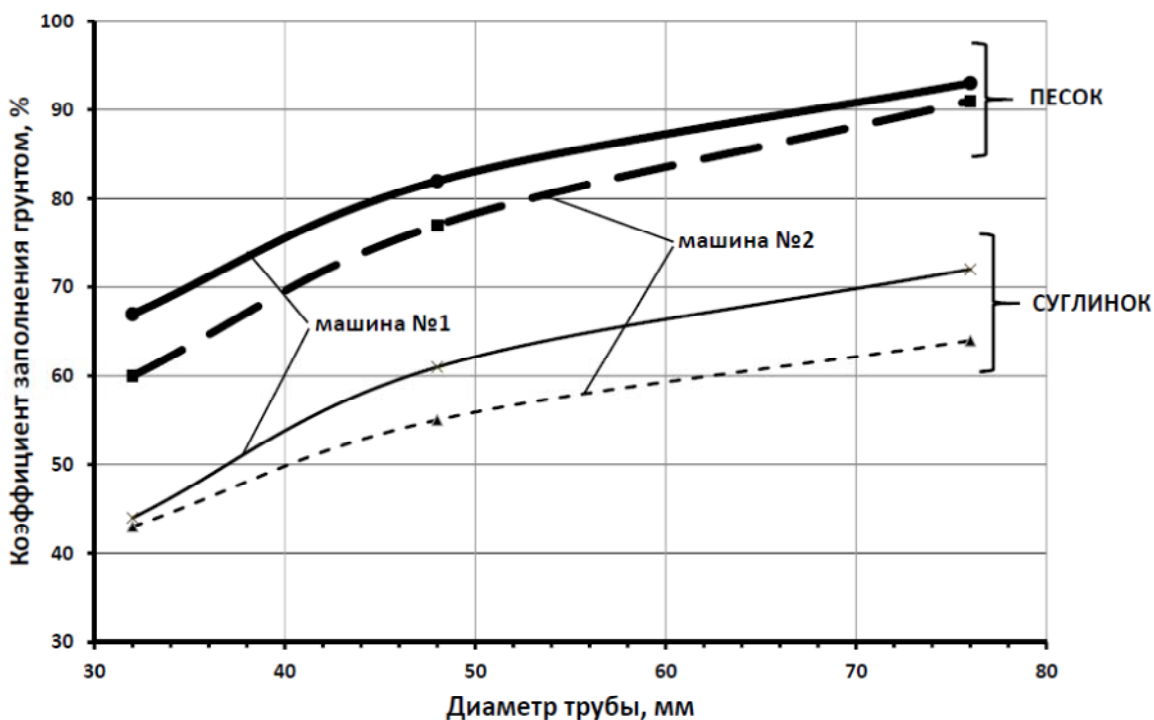


Рис. 4. Влияние диаметра трубы на приращение грунтовой пробки

## ***Обсуждение***

Из графиков видно, что при увеличении диаметра погружаемой трубы коэффициент заполнения возрастает с убывающей интенсивностью. При этом ударная машина №1 показала чуть большие значения коэффициента заполнения, что может быть связано с влиянием скоростью погружения на процесс проникновения грунта в полость трубы за счет большей инерционной составляющей движущей силы.

В песках коэффициент заполнения выше в среднем на 20 % по сравнению с результатами, полученными в суглинках. Анализ зарубежных экспериментальных исследований [18-20] подтверждает данную закономерность. Различие коэффициента заполнения в песках и суглинках связано, прежде всего с эффектом тиксотропного разжижения грунтов при вибрационном воздействии на них. Так, например, в экспериментах [16] также установлено, что чем больше песчаных частиц в грунте, тем меньшее усилие необходимо приложить для сдвижения порции грунта, но только в режиме одновременного ударного воздействия.

## ***Заключение***

Увеличение диаметра во всех случаях приводит к более росту длины грунтового керна внутри трубы по отношению к глубине погружения. При этом коэффициент заполнения в песчаных грунтах во всех случаях выше чем в глинистых. Вместе с тем, форма ударного импульса оказывает незначительное влияние на коэффициент заполнения в исследованных грунтовых условиях.

## ***Благодарности***

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда № 17-77-20049 «Физическое и математическое моделирование формирования и удаления грунтового керна в процессе динамического погружения полой трубы в грунтовый массив.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Murthy D. S., Robinson R. G. and Rajagopal K. Formation of soil plug in open-ended pipe piles in sandy soils // International Journal of Geotechnical Engineering – 2018 (DOI:10.1080/19386362.2018.1465742).
2. Кондратенко А.С., Тимонин В.В., Абиров А.А., Госманов М.К., Есенов Б.У., Жаркенов Е.Б. Технология безопасного сооружения бестраншейных горизонтально-наклонных скважин // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 1. – С. 40-45.
3. Kondratenko A. S. Smolentsev A. S., Timonin V. V. and Primychkin A. Yu. The perspective of batch-wise removal of soil plug from pipes during trenchless installation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 134. Pp. 1-4 (DOI:10.1088/1755-1315/134/1/012029).
4. Кондратенко А. С. Особенности отчистки обсадной трубы от грунтового керна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 7. – С. 327-331.
5. Червов В.В., Кондратенко А.С. Пневмомолот "тайфун-70" и новый метод очистки трубы от грунтового керна // Механизация строительства. - 2006. - № 8. - С. 8-11.



6. Александрова Н. И., Кондратенко А. С. Расчет движения трубы с грунтовой пробкой при продольном импульсном воздействии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 3. – С. 29–42.
7. Александрова Н.И. о влиянии внутренней грунтовой пробки на процесс ударного забивания трубы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 114–126.
8. Конури́н А. И., Кондратенко А. С. Численное моделирование процесса формирования грунтовой пробки при погружении трубы открытым торцом в массив // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 6. – С. 78–88.
9. Смоленцев А.С. Оценка влияния элементов ударной системы пневмомолота на эффективность погружения в грунт обсадной трубы при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук. – Новосибирск. – 2012.
10. Стихановский Б. Н. Механика удара. – Омск, 2002. – 200 с.
11. Петреев А. М., Смоленцев А. С. Сравнительная оценка потерь энергии при передаче удара длинной трубе через адаптеры разных типов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 64–69.
12. Примычкин А.Ю., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Определение параметров системы воздухораспределения с упругим клапаном для погружного пневмоударника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 141–145.
13. Isakov A.L., Shmelev V.V. Shock-pulse transmission on driving metal tubes into the ground // Journal of Mining Science. – 1998. – Т. 34. – № 1. – С. 73–79.
14. Примычкин А.Ю. Модель кольцевого упругого клапана как составная часть модели пневмоударной машины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 39–44.
15. Гилета В.П., Ваняг Ю.В., Тищенко И.В., Ведель П.М., Волков Н.С. Применение малогабаритного пневмоударного механизма // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 319–324.
16. Кондратенко А.С., Петреев А.М., Примычкин А.Ю., Смоленцев А.С. Влияние ударных импульсов на процесс транспортирования керна при погружении обсадной трубы в грунт // В сборнике: Проблемы механики современных машин материалы VII Международной научной конференции. – 2018. – С. 42–45.
17. ГОСТ 30416-2012 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения
18. Miller G. A. and Lutenegeger A. J. Influence of pile plugging on skin friction in overconsolidated clay // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – 1997. – 123 (6). – С. 525-533.
19. Bruno D. and Randolph M. F. Dynamic and static load testing of model piles driven into dense sand // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering – 1999. – 125 – С. 988–998.
20. Murthy D. S., Robinson R. G. & Rajagopal K. Formation of soil plug in open-ended pipe piles in sandy soils // International Journal of Geotechnical Engineering – 2018. DOI: 10.1080/19386362.2018.1465742.

© А. С. Смоленцев, А. Ю. Примычкин, 2019