

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ СКВАЖИН В ГРУНТЕ МЕТОДОМ ПРОДАВЛИВАНИЯ

**Б. Б. Данилов, А. С. Кондратенко,
Б. Н. Смоляницкий, А. С. Смоленцев**

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

Рассмотрена проблема совершенствования технологии сооружения скважин методом продавливания на основе порционного удаления грунтового керна в процессе погружения трубы в грунтовый массив под действием ударной нагрузки. Важным ее достоинством является возможность совмещения операций погружения трубы и удаления из нее грунтового керна. Установлено минимальное давление воздуха, необходимое для отделения части керна и его транспортирования по трубе. Проведена экспериментальная проверка на периодичность разрушения и транспортирования грунтового поршня в процессе виброударного продавливания труб в грунте при подземном строительстве коммуникаций. Подтверждена возможность сокращения времени сооружения подземных переходов бестраншейным способом и повышения уровня механизации работ.

Скважина, погружение, пневмомолот, труба, транспортирование, грунтовый керн, поршень, сжатый воздух, давление

Сооружение скважин в породном массиве — важная составная часть технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых и специальных работ в подземном строительстве. В последнее время объем работ, связанных с бестраншейной прокладкой подземных коммуникаций, заметно увеличивается в связи с повышением технического уровня применяемого оборудования и качественными изменениями в технологическом процессе [1].

Основой многообразия технологий проходки скважин в грунте являются три метода — прокол, продавливание и бурение, принципиально различающиеся способами формирования скважины [2, 3]. Первые два используются для сооружения скважин в грунтовых массивах, третий — как в грунтах, так и в прочных горных породах [1, 4].

Достоинство первых двух методов состоит в простоте технологического процесса и применяемого оборудования. Прокол целесообразен для сооружения скважин диаметром до 250, реже до 300 мм. Это ограничение обусловлено значительным возрастанием энергоемкости процесса при увеличении диаметра, поскольку объем деформируемого грунта растет при этом в квадратичной зависимости [5, 6].

Метод продавливания не имеет таких ограничений, поэтому он более универсальный. К тому же опережающая обсадка скважины стальной трубой позволяет вести работу в широком диапазоне грунтовых условий. Суть его заключается в том, что труба под действием статического или динамического усилия внедряется в грунтовый массив открытым передним торцом. Грунт при этом заполняет внутреннюю полость трубы (рис. 1) и после его удаления труба может быть кожухом для размещения разного рода коммуникаций. В связи с тем, что при продавливании разрушение грунта происходит в основном по периметру скважины, силы сопротивления внедрению трубы при одинаковом ее диаметре существенно меньше, чем при проколе.

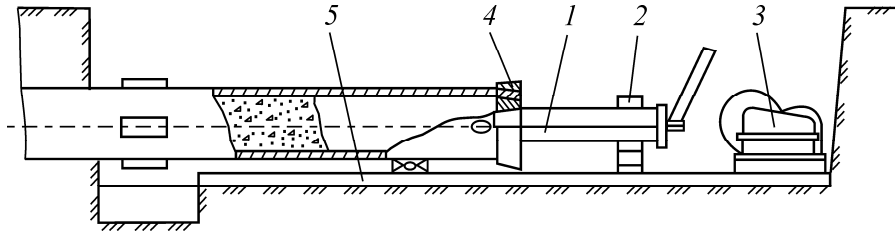


Рис. 1. Виброударное продавливание стальной трубы: 1 — пневмоударный молот; 2 — специальная опора; 3 — лебедка; 4 — кольца для соединения молота с трубой; 5 — направляющая

Технические сложности возникают при статическом способе продавливания трубы из-за того, что силы трения о грунт действуют как по ее внешней, так и по внутренней поверхности [7]. В результате перемещающийся внутри трубы грунтовый керн замедляет движение, приводя к образованию пробок, последующему пластическому деформированию грунта по всей площади поперечного сечения и резкому падению скорости погружения трубы из-за роста сопротивлений вплоть до остановки процесса. Его продолжение становится возможным лишь после очистки внутренней полости трубы от керна. Это является одной из основных причин ограничения технологии статического продавливания.

При виброударном продавливании снижению сил сопротивления способствуют разрыхление грунтового керна и последующее его инерционное перемещение под действием ударов в направлении пневмомолота. Вследствие этого энергоемкость виброударного продавливания существенно уменьшается по сравнению со статическим способом, а грунтовая пробка образуется при большей длине керна в трубе, позволяя погружать ее на более протяженное расстояние без промежуточных очисток [2, 3]. Кроме того, стабильность заданного направления при виброударном продавливании, как правило, бывает выше, чем при статическом [8, 9].

Характер и степень влияния керна на производительность виброударного продавливания можно оценить по данным хронометража процесса забивания стального кожуха диаметром 530 мм на длину 28 м в грунтовый массив плотностью около $1.8-2 \text{ г/см}^3$ [10]. Продавливание осуществлялось посекционно тремя отрезками длиной 10 м каждый. После внедрения каждой секции проводилась очистка полости трубы от набранного грунта.

На рис. 2 представлена зависимость скорости погружения трубы от длины внедренной в грунт ее части.

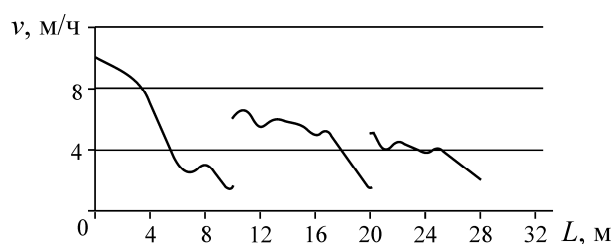


Рис. 2. Зависимость скорости погружения трубы от длины внедренной в грунт ее части

В процессе внедрения первой секции на длину до 10 м скорость ее перемещения упала в 5 раз, с 10 до 2 м/ч. После удаления грунта и наращивания следующей секции скорость выросла до 6 м/ч, а по мере дальнейшего внедрения до длины 20 м вновь уменьшилась до значения 2 м/ч. Повторное удаление грунтового керна снова привело к увеличению скорости до 5 м/ч. Характер ее дальнейшего спада по мере увеличения длины внедренной в грунт части трубы мало отличается от первых двух участков графика.

Из анализа представленной зависимости следует, что увеличение частоты операций по удалению грунта позволит повысить среднюю скорость погружения трубы и сократить время проведения работы. Однако на практике смена технологического оборудования является процессом длительным и трудоемким. Именно поэтому операцию очистки проводят после внедрения секции трубы, совмещая ее с демонтажем пневмомолота перед наращиванием следующей секции. Следует отметить, что это не всегда возможно. В неблагоприятных грунтовых условиях при продавливании каждой секции трубы удаление керна часто приходится проводить несколько раз.

Наиболее универсальным оборудованием для удаления грунта из трубы являются желонки [2]. Они просты по устройству и могут использоваться на любом этапе продавливания кожуха. Именно возможность удаления грунта на любом этапе продавливания является одним из ключевых факторов, позволяющих гарантированно реализовать эту технологию в сложных грунтовых условиях. Существенный недостаток желонки — низкая долговечность и малая производительность вследствие циклического характера их работы [11].

Особенности виброударного продавливания стальных трубчатых кожухов свидетельствуют о необходимости совершенствования технологии и технических средств для удаления грунтового керна из их полости. Эффективность решения заключается в создании методов периодического разрушения грунтовой пробки и транспортирования ее в сторону ударной машины до выхода из забиваемой трубы без применения желонки и иных дополнительных технических средств. Этот процесс желательно выполнять непрерывно и одновременно с забиванием трубы в грунтовый массив.

В ИГД СО РАН для реализации непрерывного порционного удаления керна предложено подвести сжатый воздух к переднему торцу трубы по отдельному трубопроводу. В этом случае сжатый воздух отделит порцию грунта, сформирует рабочую камеру и переместит грунт, как своего рода поршень, в направлении, противоположном забою с последующим удалением из трубы [12].

Технологическая схема порционного удаления керна при погружении в грунт трубы методом виброударного продавливания представлена на рис. 3.

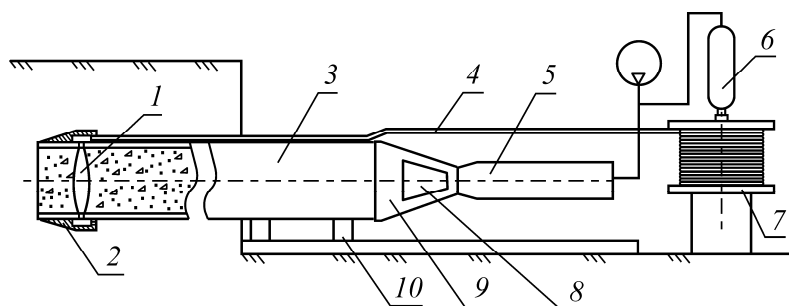


Рис. 3. Схема компоновки технологического оборудования для виброударного продавливания с порционным удалением грунтового керна: 1 — рабочая камера; 2 — насадка; 3 — труба; 4 — вспомогательный трубопровод; 5 — пневмомолот; 6 — ресивер; 7 — вертлюг; 8 — окно для выхода грунта; 9 — насадка с окнами; 10 — направляющая

Для гарантированного отсечения порции керна от грунтового массива в районе переднего торца трубы устанавливается насадка, которая имеет кольцевую камеру с несколькими отверстиями, равномерно распределенными по периметру. Расстояние от переднего торца трубы до места расположения этих отверстий выбирается в зависимости от способа погружения обсадной трубы.

Ввиду того, что диаметр насадки больше диаметра трубы, возникает вероятность прорыва воздуха в атмосферу по затрубному пространству (между внешней поверхностью трубы и стенками скважины). Поэтому насадку следует размещать на расстоянии от переднего торца не меньшем, чем диаметр трубы (рис. 4) [6].

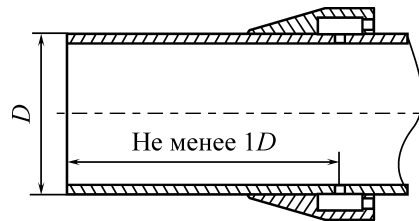


Рис. 4. Схема установки насадки на трубу

Увеличение диаметра скважины в результате использования насадки приводит к снижению силы трения обсадной трубы о грунт. Это положительно сказывается на скорости погружения трубы в грунтовой массив.

Для удаления грунта из трубы осуществляют следующие операции (см. рис. 3):

- на первой секции обсадной трубы 3 монтируется насадка 2;
- к входному штуцеру насадки подключается вспомогательный трубопровод 4, намотанный на специальный вертлюг 7, который подключен к пневматическому ресиверу;
- на направляющие 10 устанавливают первую секцию забиваемой трубы, на заднем торце которой закреплена переходная насадка 9 с окнами для выхода грунта;
- с помощью пневмомолота 5 трубу забивают в грунтовой массив на глубину не менее 2 – 10 диаметров трубы;
- резким открытием пневматического крана сжатый воздух подают в грунтовой массив по вспомогательному трубопроводу, не останавливая работу пневмомолота. Если первая порция грунта не вышла из трубы (вследствие ее разрушения при транспортировании), то с большой вероятностью это произойдет после отделения второй или третьей порции грунта;
- последние две операции повторяют до выхода переднего торца обсадной трубы в приемный котлован.

Для оценки эффективности этого способа с помощью математической модели, описывающей процесс движения грунтового поршня по трубопроводу [13], определялись условия транспортирования грунтовых поршней в трубах различного диаметра при изменении длины, а следовательно, и массы поршня. При этом приняты следующие допущения [14, 15]:

- тело поршня не уплотняется под действием внешних сил, а все его сечения движутся в осевом направлении синхронно. Сила сопротивления движению по боковой поверхности поршня в различных сечениях обусловлена давлением на грунтовой скелет;
- сжатый воздух, являющийся рабочим телом, в пневмотранспортной системе рассматривается как идеальный газ, и скорость его поступления в полость трубопровода не зависит от величины давления в ней.

Расчетная схема пневмотранспортной системы периодического действия [13] приведена на рис. 5.

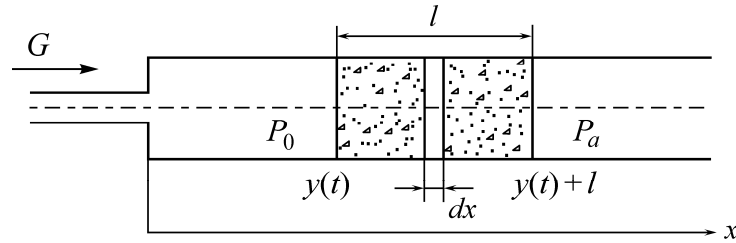


Рис. 5. Расчетная схема пневмотранспортной системы

Равновесие единичного слоя грунтового поршня с учетом инерционных сил в произвольном сечении описывается уравнением

$$\rho \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{dp_c}{dx} - \alpha p_c - \rho g k, \quad (1)$$

где $y(t)$ — текущая координата края поршня по оси x ; t — время; $p_c = f(x, t)$ — давление грунтового скелета в произвольном сечении; k — коэффициент трения грунта о стенку трубопровода; g — ускорение свободного падения; ρ — плотность материала; $\alpha = 4k\beta/D$ (β — коэффициент распора грунта), D — диаметр трубопровода.

Давление воздуха газа перед пробкой определяется из уравнения состояния при условии, что скорость поступления газа не зависит от его давления в полости трубопровода:

$$P_0 = \frac{m_r}{V} RT = \frac{G_0 + Gt}{S y(t)} RT, \quad (2)$$

здесь m_r — масса газа; V — объем трубопровода перед поршнем; G_0 — начальная масса газа перед поршнем; G — скорость увеличения массы воздуха; S — площадь сечения трубопровода.

Давление газа, при котором начнется движение поршня, запишется в виде

$$P_0 = \frac{gk\rho(e^{\alpha l} - 1)}{\alpha} + P_a, \quad (3)$$

где l — длина грунтового поршня; P_a — атмосферное давление.

При расчетах диапазон изменения диаметра трубопровода, по которому транспортировался разрушенный при бурении грунт, изменялся от 0.325 до 0.63 м. Данное решение обусловлено тем, что трубы таких диаметров наиболее часто применяются для сооружения подземных переходов бестраншейным способом.

По результатам расчетов построены зависимости давления воздуха в трубопроводе от массы транспортируемого грунтового поршня при различных диаметрах трубопровода (рис. 6).

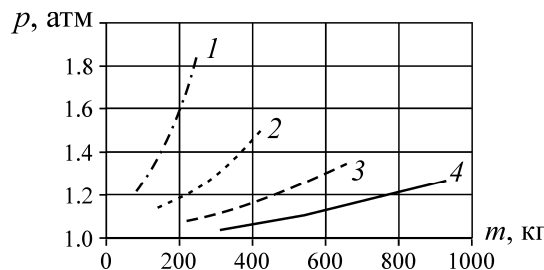


Рис. 6. Зависимости давления воздуха, необходимого для перемещения грунтового поршня, от его массы при диаметре трубопровода, м: 1 — 0.325; 2 — 0.426; 3 — 0.530; 4 — 0.630

Длина транспортируемого поршня в зависимости от диаметра трубы и его массы изменялась от 0.5 до 2 м.

Для проверки полученных зависимостей проведены эксперименты. На первом этапе оценено давление воздуха, необходимое для отделения грунтового керна, полученного при статическом вдавливании в естественную супесь второй категории прочности стальной трубы диаметром 0.1 м с толщиной стенки 0.07 м и длиной 2 м [16]. Труба внедрялась в грунт на глубине 1 м от дневной поверхности.

При подаче сжатого воздуха он, истекая в виде струй через выходные отверстия, отсекал грунтовый поршень от массива керна. После этого между поршнем и массивом образовывалась камера, давление в которой воздействовало на его торцевую площадь, в результате чего поршень перемещался в рабочий котлован. Установлено, что минимальное давление воздуха, необходимое для отделения грунта, составляет 0.4 МПа, а для его транспортирования по трубе следует поддерживать давление среды равным 0.15 МПа [11]. Полученные результаты позволили оценить эффективность способа порционного удаления грунта при статическом продавливании и прогнозировать параметры процесса образования и транспортирования грунтового поршня из внутренней полости трубы при сооружении протяженных бестраншейных переходов.

Возможность отделения керна и его транспортирования по трубопроводу сжатым воздухом при виброударном способе воздействия на трубу проверена на втором этапе экспериментов в процессе продавливания стальных трубчатых кожухов диаметром от 273 до 630 мм в грунтовые массивы естественного сложения на реальных объектах. Процесс отделения керна осуществлялся при одновременном действии ударной нагрузки и давления воздуха (см. рис. 3). При формировании керна длиной от 1 до 3 м сжатый воздух подавался к насадке по вспомогательному трубопроводу 4 при сообщении его с магистралью, питающей пневмомолот. Давление воздуха в трубопроводе 4 и магистрали устанавливалось на уровне 0.3–0.4 МПа, что вызывало снижение ударной мощности и уменьшение скорости внедрения трубы. Такое комбинированное воздействие продолжалось от 30 до 60 с. Этого времени было достаточно для отделения керна от массива и перемещения его на некоторое расстояние, величина которого зависела от физико-механических свойств грунта. Движение керна самопроизвольно прекращалось, когда он в процессе движения по трубе начинал разрушаться. Это приводило к потере им поршневых свойств и прорыву воздуха.

Сопутствующее этому явлению падение давления в магистрали и выход воздуха через окна 8 (см. рис. 3) служили сигналом к окончанию подачи воздуха во вспомогательный трубопровод. Давление в магистрали, питающей пневмомолот, повышалось до номинального значения и при дальнейшем погружении трубы в ее внутреннюю полость поступала новая порция грунта, которая вновь отделялась и транспортировалась. При этом происходило восстановление поршневых свойств грунта, отделенного на предыдущей стадии, и процесс его транспортирования возобновлялся до выхода керна из окон 8. Через эти же окна проводился визуальный контроль за перемещением керна.

Характерной особенностью транспортирования керна при внедрении трубы в слабосвязный грунт (легкая супесь) являлось его быстрое разрушение. Однако транспортирование грунта при этом не прекращалось, а приобретало иной характер, аналогичный процессу пневмотранспортирования сыпучих материалов. Таким образом, значительная часть грунта выбрасывалась наружу через окна в задней части трубы. В результате эксперимента труба была забита на длину 20 м без остановок на очистку от грунта.

Критерием эффективности технологического процесса служила скорость погружения трубы (630 мм), которая фиксировалась на мерном участке непосредственно перед подачей воздуха во вспомогательный трубопровод и сразу после нее. Результаты опытов отражены на рис. 7.

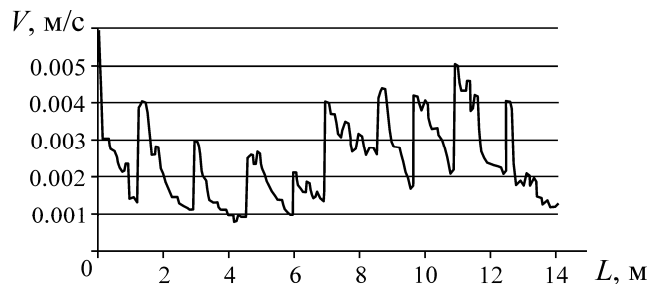


Рис. 7. Зависимость скорости погружения трубы от длины внедренной в грунт ее части

Положительный эффект в виде увеличения скорости погружения после воздействия на керн сжатым воздухом, его отделения от массива и транспортирования наблюдался во всех случаях. Возрастание скорости и длительность сохранения этого эффекта изменялись в зависимости от физико-механических свойств грунтового массива. Чем больше было расстояние, которое грунтовой поршень успевал пройти до начала своего разрушения, тем дольше сохранялась увеличившаяся скорость внедрения трубы.

ВЫВОДЫ

Предложенная технологическая схема порционного удаления грунтового керна в процессе погружения трубы в грунтовой массив методом продавливания достаточно проста и эффективна, не требует дорогостоящего оборудования. Важным ее достоинством является возможность совмещения операций погружения трубы и удаления из нее грунтового керна.

Методом математического моделирования установлено и экспериментально подтверждено, что минимальное давление воздуха, необходимое для отделения пробки, составляет 0.4 МПа, а для его транспортирования по трубе давление среды должно быть равным 0.15 МПа.

Экспериментальная проверка возможности осуществления периодического разрушения и транспортирования грунтового поршня при виброударном продавливании труб в грунт при подземном строительстве коммуникаций свидетельствует о сокращении времени сооружения подземных переходов бестраншейным способом и повышении уровня механизации работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Анализ тенденций развития современных технологий сооружения скважин в породном массиве // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2014. — № 1. — Т. 2. — С. 104–113.
2. Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б. Ф. Симонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. — 204 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 43).
3. Смоляницкий Б. Н., Опарин В. Н., Денисова Е. В., Кондратенко А. С., Тищенко И. В., Смоленцев А. С., Хмелинин А. П., Конуринов А. И. Современные технологии сооружения протяженных скважин и технические средства контроля их траектории. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. — 237 с.
4. Кондратенко А. С., Тимонин В. В., Патутин А. В. Перспективы направленного бурения прочных горных пород // *ФТПРПИ.* — 2016. — № 1. — С. 124–131.

5. Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д., Плавских В. Д., Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Тупицын К. К., Чепурной Н. П. Пневмопробойники. — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.
6. Кондратенко А. С., Тимонин В. В., Абирова А. А., Госманов М. К., Есенов Б. У., Жаркенов Е. Б. Технология безопасного сооружения бестраншейных горизонтально-наклонных скважин // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 1. — С. 40–44.
7. Александрова Н. И. Численно-аналитическое исследование процесса ударного погружения трубы в грунт с сухим трением. Ч. 1: Внешняя среда не деформируема // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 104–119; Ч. 2: Внешняя среда деформируема // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 91–106.
8. Meskele T., Stuedlein A. W. Hammer-pipe energy transfer efficiency for pipe ramming, Proc., No-Dig 2013, North American Society for Trenchless Technology, Sacramento, California.
9. Meskele T., Stuedlein A. W. Drivability analyses for pipe-ramming installations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, Oregon State Univ., Corvallis, OR.
10. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Пути повышения эффективности забивания в грунт стальных труб пневматическими молотами // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 81–88.
11. Кондратенко А. С., Петреев А. М. Особенности процесса удаления грунтового керна при виброударном воздействии на трубу и статическом воздействии на керн // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 36–46.
12. Пат. 2501913 РФ. Способ бестраншейной прокладки труб в грунте / А. С. Кондратенко, А. М. Петреев // Оpubл. в БИ. — 2013. — № 35.
13. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Шер Е. Н. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 66–74.
14. Герц Е. В. Динамика пневматических систем машин. — М.: Машиностроение, 1985. — 255 с.
15. Иосилевич Г. Б. Прикладная механика: учебник для машиностроит. спец. вузов. — М.: Машиностроение, 1989. — 351 с.
16. Фатеев Н. Т., Сергеев С. В., Карякин В. Ф., Гапон С. В., Щетинин О. В. Технология направленного гидроразрыва для создания в массиве пород ограждающих конструкций // ГИАБ. — 2008. — № 1. — С. 260–264.

Поступила в редакцию 12/III 2017