

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОГО ГРУНТА СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

**Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, Е. Н. Шер**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Обсуждается проблема транспортирования пластичной грунтовой массы воздушным потоком по горизонтальному вращающемуся трубопроводу. Приведено экспериментальное подтверждение возможности транспортирования грунта порциями, формируемыми при вращении трубопровода. Установлена зависимость скорости перемещения грунта по трубопроводу от его диаметра и напорного давления воздуха, положенная в основу определения параметров транспортной магистрали буровой установки.

*Бурение, скважина, трубопровод, транспортирование, грунтовая порция, перепад давления*

Проходка протяженных скважин в породном массиве — важнейшая составляющая технологий разработки месторождений полезных ископаемых как подземным, так и открытым способом. Она широко используется и в технологиях подземного строительства коммуникаций и объектов инфраструктуры без вскрытия породного массива. Наиболее универсальным методом проходки является бурение [1], которое включает в себя два основных процесса: разрушение породы и ее удаление из скважины.

Удаление разрушенной породы в буровых процессах, как правило, производится непрерывно и одновременно с формированием скважины. Ее транспортирование осуществляется механическим способом, например шнеками либо потоками жидкости или воздуха.

При бурении скважин в грунте, особенно в городских условиях и при отрицательных температурах, предпочтительным является применение пневмотранспорта. Важное преимущество этого способа транспортирования грунта по сравнению с механическим — низкая материалоемкость, а в отличие от гидравлического он исключает использование значительных объемов жидкого бурового раствора и последующей его утилизации. “Сухая” технология позволяет избавиться от избыточного размывания стенок скважин, образования каверн и прочих нарушений целостности массива, приводящих к просадкам дневной поверхности грунта и обрушению дорог [2–4].

Бурение горизонтальных и пологонаклонных скважин имеет специфику, затрудняющую эффективное применение пневмотранспорта. При горизонтальном расположении транспортной магистрали вектор силы тяжести удаляемых породных частиц направлен перпендикулярно к

направлению воздушного потока и частицы периодически оседают, образуя подстилающий слой, создающий дополнительное сопротивление их движению и провоцирующий последующее закупоривание магистрали. Для поддержания частиц во взвешенном состоянии на всем пути транспортирования необходима скорость воздушного потока, превышающая скорость витания частиц.

В ИГД СО РАН разработана технология бурения горизонтальных и наклонных скважин, предусматривающая удаление разрушенной при бурении породы воздушным потоком по вращающемуся трубопроводу постоянного сечения [2, 5]. Такое решение позволило надежно транспортировать грунт на расстояние до 100 м при напорном давлении в магистрали всего 0.2–0.3 МПа [4].

Это объясняется тем, что во вращающемся трубопроводе подъемная сила не имеет определяющего значения для транспортирования грунтовых частиц. Вращение вызывает постоянный подъем транспортируемого материала вверх по внутренней поверхности трубопровода, обеспечивающий снижение скорости воздушного потока до значений, не достаточных для возникновения подъемной силы в неподвижном трубопроводе. Таким образом, вращение трубопровода исключает или серьезно затрудняет образование подстилающего слоя на дне транспортного канала и его закупоривание [6, 7].

Грунт характеризуется значительным разнообразием физико-механических свойств. В зависимости от влажности в разрушенном виде он может быть сыпучим или представлять собой пластичную массу, которая при недостаточной скорости воздушного потока налипает на внутреннюю поверхность неподвижного трубопровода, уменьшая проходное сечение или полностью перекрывая его. Транспортирование такого грунта воздушным потоком является непростой технической задачей.

Наблюдения показали, что транспортирование по вращающемуся трубопроводу влажного пластичного грунта, частицы которого легко соединяются после разрушения, может происходить порциями определенной величины, заполняющими все сечение трубопровода и образующими при этом своеобразный грунтовый поршень. Вращение трубопровода и низкая скорость воздушного потока — основные факторы, способствующие формированию такого поршня из непрерывно поступающей грунтовой массы. В процессе движения грунтовый поршень может периодически разрушаться и вновь формироваться за счет поступления следующих порций грунта.

С целью проверки обоснованности этих положений и определения исходных данных для расчета основных параметров транспортной магистрали проведены экспериментальные исследования процесса движения пластичного грунта во вращающемся трубопроводе на лабораторном стенде, основными элементами которого являются:

- стальная труба длиной 10 м и диаметром 1 м, заполненная грунтом изнутри;
- макет бурового станка с буровой колонной;
- макет инструмента для сооружения пионерной скважины;
- макет инструмента для расширения скважин;
- транспортный трубопровод;
- контрольно-измерительные приборы и инструменты.

Труба, являющаяся грунтовым каналом, установлена и закреплена на бетонном основании при помощи специальных опор (рис. 1). В верхней части канала предусмотрены люки, через которые производится загрузка и уплотнение грунта, представляющего собой естественную супесь. Грунт укладывался в загрузочную емкость с увлажнением и послойным трамбованием. Толщина каждого уложенного слоя составляла 0.15–0.2 м.



Рис. 1. Грунтовый канал

Макет инструмента для расширения скважин имеет вид полого цилиндра, переходящего в усеченный конус, соединяющийся меньшим основанием с буровой колонной. На конической поверхности выполнено отверстие для забора грунта, сообщающееся с транспортным трубопроводом. На этой же поверхности установлен козырек, направляющий разрушенный грунт в заборное отверстие (рис. 2).



Рис. 2. Макет инструмента для расширения скважин

Схема проведения экспериментов показана на рис. 3. Макет инструмента вращался с частотой 0.5–0.65 1/с. Сжатый воздух подводился через буровую колонну и далее по каналу внутри инструмента поступал в полость транспортного трубопровода, где смешивался с поступающим туда же разрушенным грунтом. Бурение скважин осуществлялось макетом расширителя диаметром 0.43 м при скорости его перемещения в грунте от 20 до 30 м/ч, что соответствовало среднестатистическим реальным условиям [1]. В процессе бурения выполнялся визуальный контроль за выходом из транспортного трубопровода порций грунта, велась фото- и видеосъемка процесса. Каждая выброшенная из трубопровода порция грунта собиралась отдельно от других и взвешивалась.

Опыты проводились при различной влажности грунта. Для этого грунт искусственно увлажнялся при его послойной закладке в полость грунтового канала от естественного уровня (4–6 %) до повышенного (20–22 %).

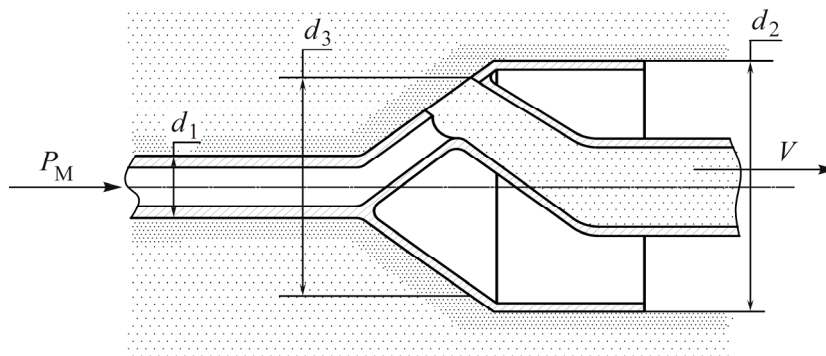


Рис. 3. Схема проведения экспериментов:  $d_1$  — диаметр пионерной скважины;  $d_2$  — диаметр разбуриваемой скважины;  $d_3$  — диаметр зоны, из которой удаляется грунт;  $P_M$  — давление сжатого воздуха на входе в транспортный трубопровод;  $V$  — скорость движения поршня в трубопроводе

В результате экспериментов установлено, что вращение транспортного трубопровода в процессе поступления в него разрушенного грунта приводит к самопроизвольному формированию грунтовых поршней. Их масса изменялась от 10 до 40 кг (рис. 4). Это объясняется тем, что в процессе транспортирования грунтовые поршни неоднократно разрушаются, а затем вновь образуются путем объединения со следующими за ними порциями грунта. Транспортирование поршней происходило при низкой (менее 6 м/с) скорости воздушного потока. Явных различий в характере транспортирования порций грунта с различным уровнем влажности не наблюдалось.



Рис. 4. Начальная, средняя и конечная фазы выхода порции грунта

Скорость перемещения поршня зависит в основном от диаметра трубопровода, расхода воздуха и обеспечивающего его перепада давлений, массы формируемых грунтовых поршней. В конечном счете рациональное сочетание значений перечисленных факторов определяет работоспособность пневмотранспортной системы, минимально необходимое для транспортирования на заданное расстояние давление воздуха и энергоемкость бурения скважины. Задачей исследования являлось изучение влияния перечисленных факторов на процесс транспортирования и установление рациональных значений основных из них.

Для ее решения разработана математическая модель, описывающая процесс движения грунтового поршня по трубопроводу. При этом приняты следующие допущения [8, 9]:

1. Слои грунта, образующие тело поршня, не уплотняются под действием давления газа. Все сечения поршня движутся в осевом направлении синхронно. Сила сопротивления движению по боковой поверхности поршня в различных сечениях определяется давлением на грунтовой скелет в этом сечении.

2. Сжатый воздух, являющийся рабочим телом, в пневмотранспортной системе рассматривается как идеальный газ. Скорость поступления газа в полость трубопровода не зависит от величины давления в этой полости.

3. Вращение трубопровода вокруг своей оси не оказывает влияния на динамику движения грунтового поршня.

Расчетная схема пневмотранспортной системы периодического действия представлена на рис. 5.

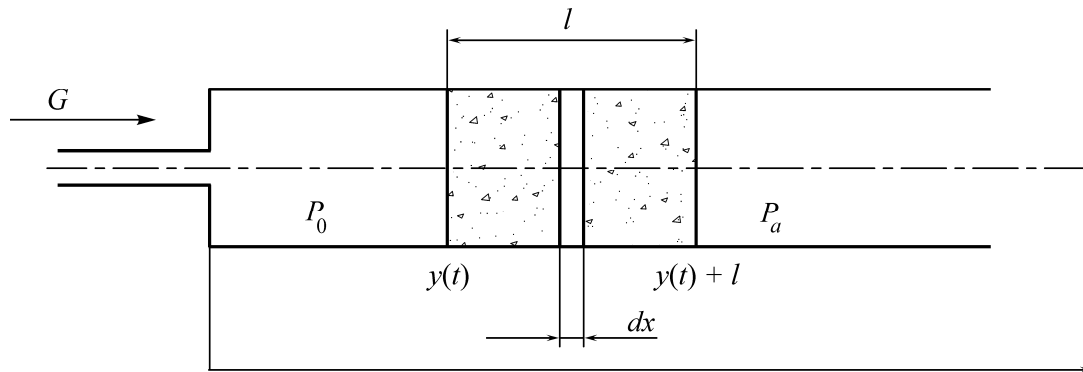


Рис. 5. Расчетная схема пневмотранспортной системы

Уравнение равновесия единичного слоя грунтового поршня с учетом инерционных сил в произвольном сечении

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

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

Из уравнения (1) после интегрирования по  $x$  с учетом граничных условий на торцах поршня следует:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{\alpha}{\rho} \frac{P_0 - P_a}{e^{\alpha \ell} - 1} - gk, \quad (2)$$

где  $\ell$  — длина грунтового поршня;  $P_0$  — давление газа перед грунтовым поршнем;  $P_a$  — атмосферное давление.

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

$$P_0 = \frac{m}{V} RT = \frac{G_0 + Gt}{Sy(t)} RT, \quad (3)$$

где  $G_0$  — начальная масса газа перед поршнем;  $G$  — скорость увеличения массы воздуха;  $S$  — площадь сечения трубопровода;  $y(t)$  — координата переднего края грунтового поршня.

Решение уравнения (2) позволяет определить закон движения поршня  $y(t)$  и давление воздуха перед поршнем  $P_0(t)$ .

В начальный момент движения  $\frac{d^2y}{dt^2} = 0$ , тогда из (3) следует, что величина давления газа, при котором начнется движение поршня:

$$P_{00} = \frac{gk\rho(e^{\alpha l} - 1)}{\alpha} + P_a. \quad (4)$$

После разгона установившаяся скорость движения поршня

$$v = \frac{GRT\alpha}{S[\rho gk(e^{\alpha l} - 1) + P_a\alpha]}. \quad (5)$$

Математическая модель процесса движения грунтового поршня в трубопроводе позволяет определить необходимую для движения величину давления на входе в трубопровод, скорость и время движения грунтового поршня при известной его массе и заданной длине трубопровода.

При расчетах диапазон изменения диаметра трубопровода, по которому транспортировался разрушенный при бурении грунт, ограничивался значениями от 0.1 до 0.3 м. Такое решение обусловлено тем, что при диаметре менее 0.1 м будет затруднительно обеспечить равномерный забор грунта по всему сечению скважины без излишнего уплотнения разрушаемой зоны, а трубопровод диаметром более 0.3 м неудобен в работе в связи с громоздкостью, большой массой.

Давление воздуха в транспортном трубопроводе не превышало 0.7 МПа, а расход воздуха 0.17 м<sup>3</sup>/с, так как в реальных производственных условиях для проходки скважин в грунте при подземном строительстве используются передвижные компрессоры, обеспечивающие именно указанные параметры воздуха в магистрали [10].

По результатам расчетов построена зависимость давления в шламопроводе от массы транспортируемого грунтового поршня при различных диаметрах трубопровода (рис. 6). На рис. 7 приведена зависимость скорости движения поршней различной массы от диаметра трубопровода.

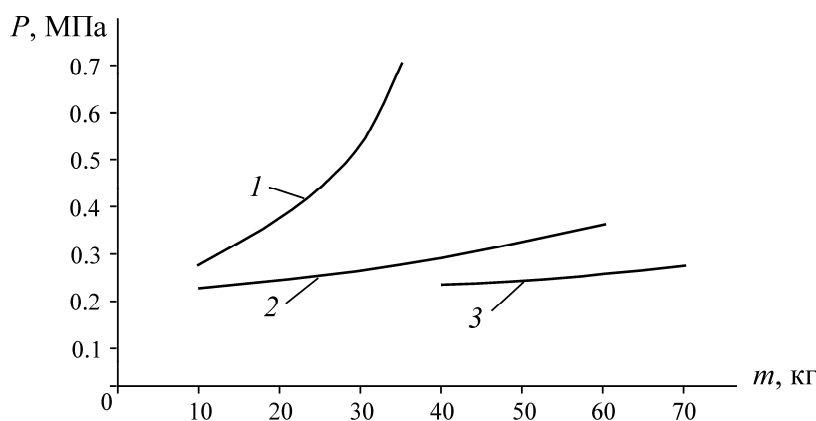


Рис. 6. Зависимость давления в трубопроводе от массы грунтового поршня для разных диаметров трубопровода  $D$ , м: 1 — 0.1; 2 — 0.2; 3 — 0.3

Наиболее важный параметр пневмотранспортной системы — давление воздуха, поскольку этим определяется уровень технических возможностей всего бурового комплекса в целом. Известно, что эффективным способом повышения производительности и расширения диапазона технических возможностей бурового процесса является использование динамического ударного и ударно-вращательного разрушающего воздействия на породный массив. Наилучшие ре-

зультаты при этом достигаются при использовании погружных ударных машин, непосредственно воздействующих породоразрушающим инструментом на забой скважины. В таком случае для транспортирования разрушенной породы используется воздух, отработанный пневмоударным механизмом и поступающий в транспортную магистраль. Чем выше в ней давление, тем меньше развиваемая пневмоударным механизмом ударная мощность, так как выхлоп воздуха из рабочих камер происходит при противодавлении [10,11].

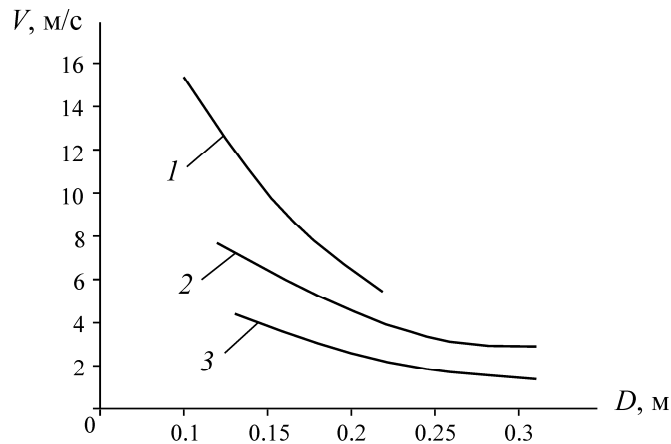


Рис. 7. Зависимость скорости движения грунтового поршня от диаметра при одинаковом расходе воздуха  $m$ , кг: 1 — 10; 2 — 20; 3 — 40

Анализ полученных результатов показывает, что для транспортирования грунтовых поршней по трубопроводу диаметром 0.1 м необходимо высокое давление воздуха перед грунтовой пробкой. При относительно небольшой массе порции 15 кг это давление уже находится в пределах 0.35–0.4 МПа. Опыт создания погружных пневмоударников и других машин ударного действия, работающих при давлении 0.7 МПа, свидетельствует о том, что для бесклапанной схемы воздухораспределения такой уровень противодавления в выхлопном тракте является предельно допустимым для их устойчивой работы [10, 11].

При дальнейшем увеличении массы поршня рост противодавления приобретает нелинейный характер, что в условиях реального строительного производства исключает применение в составе бурового комплекса погружных пневмоударников.

В трубопроводах большего диаметра транспортирование грунтовых поршней происходит при меньшем давлении воздуха (кривые 2 и 3 на рис. 6). Масса поршей в таких трубопроводах влияет на величину давления в гораздо меньшей мере, нежели в трубопроводе диаметром 0.1 м. Зависимость давления воздуха от массы порции грунта, движущейся в трубопроводах диаметром 0.2 и 0.3 м, близка к линейной во всем исследованном диапазоне.

Максимальное значение абсолютного давления в трубопроводе диаметром 0.2 м, необходимое для транспортирования поршня массой 60 кг (кривая 2 на рис. 6), составляет всего 0.3 МПа. В трубопроводе диаметром 0.3 м для транспортирования порции грунта той же массы требуется еще меньшее давление (кривая 3 на рис. 6).

Однако при увеличении диаметра трубопровода уменьшается не только давление воздуха, но и скорость транспортирования поршней. В трубопроводе диаметром 0.3 м грунтовые поршни массой 40 кг и выше движутся со скоростью менее 2 м/с (кривая 3 на рис. 7), которая может оказаться недостаточной для удаления всей грунтовой массы, поступающей в трубопровод при заданной скорости бурения. В данном случае требуется согласование этих скоростей.

Масса грунта, разрушаемая в единицу времени, зависит от диаметра скважины и скорости движения инструмента:

$$m = \frac{\pi D^2}{4} \nu \rho, \quad (6)$$

где  $D$  — диаметр скважины;  $\nu$  — скорость проходки скважины;  $\rho$  — плотность материала.

Расчеты по формуле (6) показывают, что при диаметре скважины 0.3 м и ее длине, равной среднестатистическим 60 м [1], за время, необходимое для выхода грунтовой порции массой 20 кг, в трубопровод при принятой скорости бурения 20–30 м/ч поступает около 60 кг свежего грунта. Это может привести к закупориванию трубопровода и остановке процесса.

Скорость транспортирования аналогичной порции в трубопроводе диаметром 0.2 м находится на уровне 7 м/с (рис. 7). При такой скорости достигается соответствие между поступающей в трубопровод массой грунта и удаляемой.

Проведенный анализ результатов расчетов показывает, что рациональный баланс между давлением воздуха и скоростью транспортирования пластичного грунта при бурении скважин наиболее распространенных при прокладке подземных коммуникаций диаметров от 0.27 до 0.63 м достигается при использовании транспортного трубопровода с внутренним диаметром 0.2 м. В пользу такого решения свидетельствует пологий характер кривой возрастания необходимого напорного давления воздуха при увеличении массы грунтовых поршней и удовлетворительная скорость их транспортирования.

#### ВЫВОДЫ

Транспортирование несыпучей пластичной грунтовой массы возможно порциями, образующими подобие грунтового поршня в цилиндре. Формирование поршней происходит самопроизвольно при вращении трубопровода. Движение поршня начинается после заполнения грунтовой массой всего сечения трубопровода. Вращение трубопровода способствует не только формированию грунтового поршня, но и сохранению его целостности в процессе движения и поддержанию герметичности в сопряжении поршень — цилиндр, необходимой для транспортирования.

Из условия сочетания скорости транспортирования грунтовых порций и возникающего при этом давления в полости трубопровода для бурения скважин в диапазоне диаметров от 0.27 до 0.63 м определено значение рационального внутреннего диаметра транспортного канала, равное 0.2 м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыбаков А. П.** Основы бестраншейных технологий: теория и практика. — М.: Пресс Бюро № 1, 2005.
2. **Патент РФ № 2344241.** Способ бестраншейной прокладки коммуникаций в грунте (варианты) / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий // Опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.
3. **Данилов Б. Б.** Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
4. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Создание нового бурового комплекса для проходки протяженных горизонтальных скважин с транспортированием разрушенного грунта сжатым воздухом // Строит. и дор. машины. — 2013. — № 7.



5. **Смоляницкий Б. Н.** Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
6. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Результаты экспериментальных исследований процесса горизонтального бурения с пневмотранспортом разрушенного грунта по вращающемуся трубопроводу // Journal of International Scientific Publications: Ecology&Safety, 2011, Vol. 5.
7. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
8. **Герц Е. В.** Динамика пневматических систем машин. — М.: Машиностроение, 1985.
9. **Иосилевич Г. Б.** Прикладная механика: учебник для машиностроит. спец. вузов. — М.: Машиностроение, 1989.
10. **Ткач Х. Б.** О работе пневматического поршневого привода с выхлопом в среду с давлением большим атмосферного // ФТПРПИ. — 1996. — № 6.
11. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Согласование пневматического генератора ударных импульсов с пневмотранспортной магистралью в установках горизонтального направленного бурения скважин в грунте комбинированным методом // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.

*Поступила в редакцию 21/IV 2014*