

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЙ МАГИСТРАЛИ БУРОВОГО СТАНКА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ШЛАМА РАЗРЕЖЕНИЕМ

Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий

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

Обсуждается проблема транспортирования грунтовой массы по горизонтальному вращающемуся трубопроводу за счет создаваемого в нем разрежения. Установлены зависимости скорости движения породной порции при различной ее массе от диаметра трубопровода, на основе которых разработана методика определения предельной длины транспортирования. Найдена зависимость частоты вращения транспортной магистрали от ее диаметра. Приведено экспериментальное подтверждение достоверности результатов, получаемых с применением разработанной методики расчета.

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

Бурение скважин в породном массиве является важнейшей составляющей технологий разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, их добычи как подземным, так и открытым способом. Оно широко используется для выполнения специальных работ в подземном строительстве при сооружении коммуникаций различного назначения, обеспечения устойчивости скальных и грунтовых оснований, а также связанных с ними подземных и наземных инженерных объектов.

Проходка скважины включает в себя два основных процесса — разрушение породы и удаление ее из скважины. Характер силового воздействия, разрушающего породу, и способ удаления продукта бурения из скважины — основные признаки классификации множества применяемых в настоящее время буровых технологий [1, 2].

Транспортирование разрушенной породы осуществляется чаще всего одним из трех способов: воздушным потоком, жидкостью (буровым раствором) или механическим транспортером. Пневмотранспортные системы выгодно отличаются от гидротранспортных тем, что использование воздуха в качестве очистного агента избавляет от необходимости доставлять к месту производства работ значительные объемы жидкости, а затем утилизировать отработанный буровой раствор. По сравнению с механическими пневмотранспортные системы более компактны, проще в техническом отношении и производительнее [3].

В ИГД СО РАН разработан способ пневмотранспортирования разрушенной породы, в котором транспортным каналом является специальный трубопровод, вращающийся вместе с буровой колонной и имеющий постоянное по всей длине сечение [4, 5]. Такое решение позволяет увеличить эффективность и надежность процесса транспортирования. Вращение трубопровода препятствует образованию подстилающего слоя, который может перерасти в пробку и закупорить

ритель транспортный канал. Кроме того, транспортирование происходит при меньшей, по сравнению с неподвижной магистралью, скорости воздушного потока. Предложенный способ позволяет транспортировать как сыпучую породу, так и увлажненную, частицы которой слипаются при механическом контакте, образуя пластичную массу. В процессе бурения из этой массы образуются пластичные пробки, которые под действием давления воздуха движутся по трубопроводу, как поршень в цилиндре [6].

В процессе поступательного движения по трубопроводу породный поршень может разрушаться, не доходя до конца трубопровода. Потеря поршневых свойств приводит к остановке движения. Однако вращение трубопровода и поступление новых порций породы приводит к реструктуризации пробки и восстановлению поршневых свойств.

По способу создания воздушного потока в трубопроводе пневмотранспортные установки разделяются на три существенно различающиеся группы: всасывающие (вакуумные) и нагнетательные. В установках всасывающего типа частицы материала перемещаются в трубопроводе с давлением воздуха меньше атмосферного, т. е. в разреженном воздухе, в установках нагнетательного типа — в струе сжатого воздуха.

В трубопроводах нагнетательных систем плотность сжатого воздуха больше атмосферного, а перепад давления и скорость струи воздуха могут быть значительно больше, чем в вакуумных системах. Однако использование нагнетательных систем при бурении скважин с обратной циркуляцией очистного агента предполагает наличие в буровой колонне двух каналов. Один канал необходим для подачи воздуха в забойную часть скважины, второй — для транспортирования продукта бурения. Чаще всего в таком случае используется двойная буровая колонна, что неизбежно влечет за собой усложнение всего бурового оборудования. Транспортная система всасывающего типа устраняет необходимость принудительной подачи воздуха в забойную зону скважины. Соответственно отпадает потребность в двойной буровой колонне. Это упрощает технологический процесс, удешевляет буровую оснастку и создает предпосылки для повышения эффективности управления траекторией скважины вследствие уменьшения жесткости буровой колонны (рис. 1).

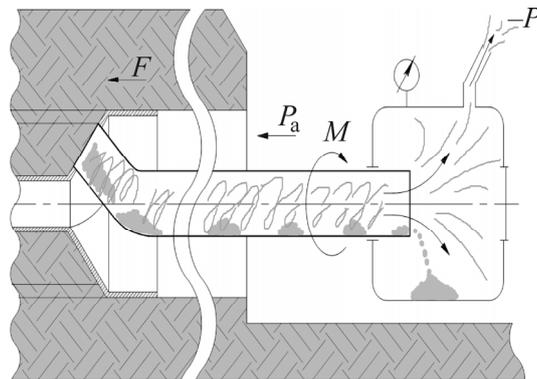


Рис.1. Технологическая схема бурения скважин с обратной продувкой и “вакуумным” транспортированием разрушенного грунта: F — усилие подачи; M — вращающий момент; P_a — атмосферное давление; $(-P)$ — разрежение в транспортной магистрали

Перепад давления на входе и выходе транспортного канала в совокупности с массой транспортируемой породной порции и диаметром трубопровода являются основными факторами, определяющими предельно достижимую длину скважин. Для оценки технических возможностей “вакуумной” пневмотранспортной системы необходимо установить характер взаимосвязи этих факторов с динамическими параметрами системы и по возможности определить их рациональные значения. Наиболее эффективно эта задача решается путем проведения вычисли-

тельных опытов на математической модели, которая описывает процесс движения грунтового поршня по трубопроводу и позволяет определить пройденный поршнем путь и его скорость на заданном временном отрезке [7].

Результаты расчетов (рис. 2) позволяют вычислить предельную массу порции разрушенной породы, которая может транспортироваться при выбранном значении перепада давления воздуха по трубопроводам различных диаметров. Так, для транспортирования грунтовой порции массой 10–15 кг по трубопроводу диаметром 0.1 м необходимо создать перепад давления в пределах 0.2–0.25 МПа (рис. 2, кривая 1), что соответствует техническим возможностям промышленных пылесосов и воздуходувок [8, 9].

Однако при дальнейшем увеличении массы порции рост давления приобретает нелинейный характер и уже при массе грунтового поршня 20–25 кг достигает 0.3–0.4 МПа, что находится за пределом технических возможностей воздуходувок.

При увеличении диаметра трубопровода масса грунтовой порции в гораздо меньшей степени влияет на перепад давления, требуемого для транспортирования поршня (рис. 2, кривые 2 и 3). Абсолютное значение максимального давления в трубопроводе диаметром 200 мм составляет 0.3 МПа при массе порции около 60 кг, а при диаметре 300 мм давление еще меньше. Таким образом, трубопровод диаметром 200 мм и более позволяет создать работоспособную магистраль для транспортирования разрушенного грунта по схеме с обратной продувкой.

Следует отметить, что при увеличении диаметра трубопровода и неизменном расходе воздуха уменьшается скорость транспортирования грунтовых порций. Это повышает вероятность одновременного нахождения в трубопроводе двух и более транспортируемых порций, особенно при значительной длине трубопровода.

На рис. 3 приведена зависимость скорости движения грунтовой порции от диаметра трубопровода при различных значениях ее массы, но при одинаковом расходе воздуха. Порции средней массы движутся со скоростью менее 2 м/с (кривая 3), что при значительной длине трубопровода может оказаться недостаточным и повлечет за собой аварийное закупоривание магистрали.

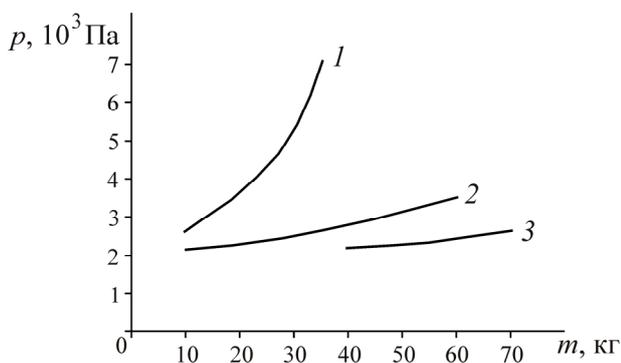


Рис. 2. Зависимость перепада давления от массы поршня для диаметров трубопровода, м: 1 — 0.1; 2 — 0.2; 3 — 0.3

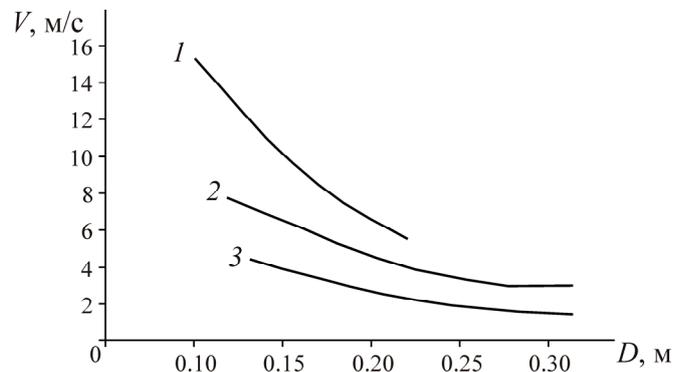


Рис. 3. Зависимость скорости движения грунтовой порции от диаметра трубопровода при ее массе, кг: 1 — 10; 2 — 20; 3 — 40

Работоспособность пневмотранспортной системы периодического действия сохраняется при условии, что транспортируемая в виде поршня-пробки порция выйдет из трубопровода до того, как на его входе сформируется новая пробка из непрерывно поступающей разрушенной породы. Время прохождения пробкой трубопровода обусловлено его длиной и скоростью движения пробки. Период формирования пробки зависит от скорости поступления разрушенной породы. Из условия равенства этих величин можно определить предельно допустимую длину трубопровода.

Результаты моделирования процесса движения пробки при перепаде давления воздуха до 0.25 МПа приведены в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1. Установившаяся скорость грунтовой пробки при неизменной ее массе в зависимости от диаметра транспортного трубопровода

$D, \text{ м}$	$V, \text{ м/с}$				
	$m = 4 \text{ кг}$	$m = 5 \text{ кг}$	$m = 6 \text{ кг}$	$m = 7 \text{ кг}$	$m = 9 \text{ кг}$
0.1	25.1	24.9	24.7	24.5	23.8
0.11	20.8	20.7	20.6	20.5	20.2
0.12	17.5	17.5	17.4	17.4	17.2
0.13	—	14.9	14.9	14.8	14.8
0.14	—	12.9	12.9	12.8	12.8
0.15	—	—	11.2	11.2	11.2
0.16	—	—	—	—	9.8
0.17	—	—	—	—	8.7

ТАБЛИЦА 2. Установившаяся скорость грунтовой пробки при неизменном диаметре транспортного трубопровода в зависимости от массы пробки

$m, \text{ кг}$	$V, \text{ м/с}$				
	$d = 0.10 \text{ м}$	$d = 0.11 \text{ м}$	$d = 0.12 \text{ м}$	$d = 0.15 \text{ м}$	$d = 0.20 \text{ м}$
3	25.20	—	—	—	—
4	25.10	20.80	17.53	—	—
5	24.90	20.70	17.47	—	—
6	24.70	20.60	17.41	—	—
7	24.50	20.50	17.34	11.21	—
8	—	20.35	17.27	11.19	—
9	—	—	17.18	11.17	—
10	—	—	—	11.14	—
11	—	—	—	11.12	—
12	—	—	—	11.09	—
13	—	—	—	—	6.31
14	—	—	—	—	6.29
16	—	—	—	—	6.28
18	—	—	—	—	6.27
20	—	—	—	—	6.26
22	—	—	—	—	6.25

На основе вышеизложенного можно вычислить предельную длину транспортирования для буровой установки с обратной циркуляцией очистного агента. На первом этапе расчета при известных технических данных источника воздушного потока (перепад давления и расход воздуха) в соответствии с зависимостью (см. рис. 2) ориентировочно определяют диаметр трубопровода и максимальную массу транспортируемой порции породы.

На втором этапе рассчитывают время накопления этой порции на входе транспортной магистрали. Оно зависит от диаметра скважины и скорости проходки. При выбранном диаметре скважины массу грунта, разрушаемого в единицу времени, находят из выражения

$$m_c = \frac{\pi \rho D_6^2}{4} V_1,$$

где D_6 — диаметр буримой скважины; V_1 — скорость поступательного движения инструмента; ρ — плотность материала.

Время образования грунтовой пробки массой m :

$$t = \frac{m}{m_c} = \frac{4m}{\pi \rho D_6^2 V_1}.$$

Определив по табл. 1 и 2 скорость породной пробки в зависимости от принятого диаметра транспортного трубопровода и массы пробки, можно вычислить предельную длину транспортирования:

$$L = vt = \frac{14400mV_2}{\pi \rho D_6^2 V_1},$$

где V_2 — скорость движения пробки.

Как уже отмечалось, вращение трубопровода способствует формированию породной пробки-поршня, сохранению ею целостности формы в процессе движения по трубопроводу, поддержанию и восстановлению поршневых свойств пробки. Поскольку шламопровод соединен с инструментом, формирующим скважинное пространство, они вращаются с одинаковой частотой, определяемой из условий достижения наибольшей эффективности процесса разрушения породы. Увеличение частоты вращения, насколько это возможно, позволяет повышать скорость проходки скважин. Однако при транспортировании разрушенной породы увеличение скорости вращения повышает силу трения породного поршня о стенки трубопровода за счет действия центробежных сил, что влечет за собой снижение скорости транспортирования. Рациональной можно считать частоту вращения, при которой центробежная сила, действующая на породные частицы, равна силе тяжести.

Дальнейшее повышение частоты уже не оказывает благоприятного воздействия на процесс формирования породной пробки, а лишь увеличивает сопротивление ее движению.

Центробежная сила $F_{ц} = mV^2 / r$, Н, где m — масса грунта, кг; r — внутренний радиус трубопровода, м; V — окружная скорость, м/с; $V = \pi nr$, n — частота вращения трубопровода, об/мин.

Тогда центробежная сила определится следующим образом:

$$F_{ц} = (4m\pi^2 n^2 r) / 3600,$$

сила тяжести $F = mg$.

Из условия равенства этих сил находится предельная частота вращения транспортной магистрали:

$$n = \sqrt{3600g / (4\pi^2 r)}.$$

На рис. 4 представлена зависимость рациональных значений частоты вращения трубопровода от его диаметра. Рациональные значения частоты вращения расположены в области, прилегающей снизу к полученной кривой.

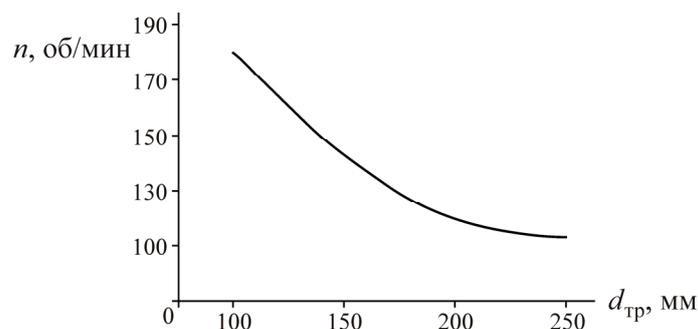


Рис. 4. Зависимость рациональных значений частоты вращения трубопровода (n) от его диаметра ($d_{тр}$)

Для принятого диапазона диаметров трубопровода они примерно соответствуют частоте вращения большинства серийно выпускаемых буровых станков, применяющихся для сооружения горизонтальных скважин. Это значительно упрощает задачу адаптации разработанной технологии к имеющимся техническим средствам.

Для проверки работоспособности транспортной магистрали вакуумного типа изготовлен ее макет в натуральную величину (рис. 5а). Макет состоял из бурового рабочего органа, формирующего скважину, соединенного с ним трубопровода, по которому продукт бурения транспортировался в специальную приемную емкость. Из емкости в процессе бурения откачивался воздух, чтобы в полости и трубопроводе поддерживалось давление воздуха ниже атмосферного.

Вращающийся трубопровод диаметром 100 мм состоял из звеньев, соединяющихся между собой через специальные муфты. Выходной конец трубопровода соединялся с приемной емкостью (рис. 5б) через сальниковый уплотнительный узел, обеспечивающий герметичность соединения вращающегося трубопровода и неподвижной приемной емкостью. Разрежение до 0.02 МПа создавалось в приемной емкости при помощи промышленного пылесоса. Для контроля величины разрежения в емкости использовался манометр. Для обеспечения возможности визуального наблюдения и видеосъемки процесса выхода грунтовых порций из трубопровода в заднем торце приемной емкости предусмотрено смотровое окно, а внутри емкости установлена осветительная лампа.

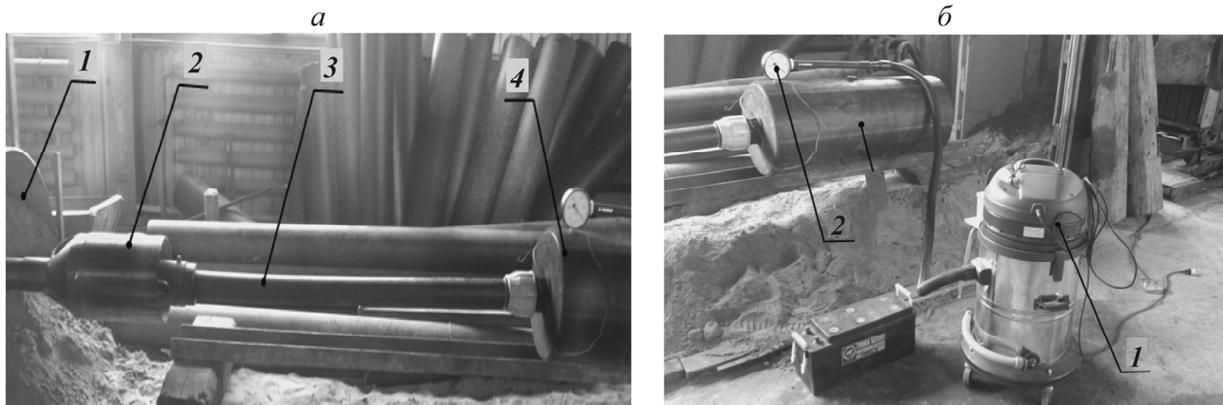


Рис. 5. Макет пневмотранспортной магистрали вакуумного типа (а): 1 — грунтовый канал; 2 — рабочий орган; 3 — транспортный трубопровод; 4 — приемная емкость; (б): 1 — промышленный пылесос; 2 — манометр

Экспериментально установлено, что пневмотранспортная магистраль вакуумного типа с вращающимся трубопроводом диаметром 100 мм обеспечивает транспортирование грунта естественной влажности на длину до 20 м. Выброс грунта в приемную емкость происходит в виде пробок-поршней массой от 4 до 7 кг, которые при выходе из трубопровода рассыпаются (рис. 6).

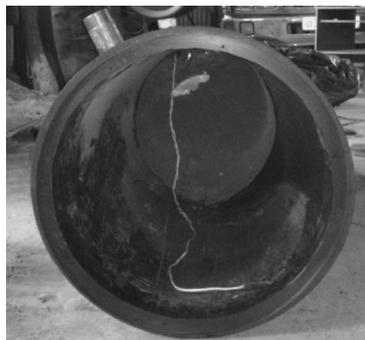


Рис. 6. Разрушившаяся грунтовая пробка внутри приемной емкости

Полученные экспериментальные результаты подтверждают достоверность моделирования и разработанной на его основе методики определения параметров транспортной магистрали.

ВЫВОДЫ

Методом математического моделирования процесса транспортирования разрушенной породы по вращающейся горизонтальной или наклонной магистрали создаваемым в ней разрежением получены зависимости скорости движения породной порции при различной ее массе от диаметра трубопровода, на основе которых разработана методика определения предельной длины транспортирования.

Установлено, что рациональной является частота вращения транспортной магистрали, при которой центробежная сила, действующая на породные частицы, равна силе тяжести. Из условия равенства этих сил определена зависимость значений частоты вращения транспортной магистрали от ее диаметра.

Экспериментально доказана достоверность результатов, получаемых с применением разработанной методики расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горные науки.** Освоение и сохранение недр Земли / под ред. акад. К. Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН, 1997. — 478 с.
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. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. (Интеграционные проекты СО РАН, вып. 43). — 204 с.
3. **Малевич И. П., Матвеев А. И.** Пневматический транспорт сыпучих строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1979. — 143 с.
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. — С. 17–22.
5. **Пат. 2344241 РФ, МПК E02F5/18 C1.** Способ бестраншейной прокладки коммуникаций в грунте (варианты) / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий; заявитель и патентообладатель Институт горного дела СО РАН. — № 2007121125/03; заявл. 05.06.2007; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. — 5 с.
6. **Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 82–91.
7. **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. 66–75.
8. <http://www.220-volt.ru/>
9. <http://www.erstvak.com/>

Поступила в редакцию 20/VI 2016