

УДК 622.233.53

Чецин Дмитрий Олегович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирское отделение РАН,
630091, Новосибирск,
ул. Красный проспект, 54
e-mail: dimixch@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ИНТЕРВАЛЬНОЙ ПРОДУВКИ ПРИ БУРЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ПНЕВМОУДАРНИКАМИ

Аннотация:

В работе приведены теоретические и экспериментальные исследования по определению параметров пневмосистемы при бурении горизонтальных скважин пневмоударником с продувкой. Рассмотрен процесс пневмотранспорта частиц в вертикальной и горизонтальной скважинах, определены основные негативные факторы, влияющие на движение частиц. По известным методикам рассчитана требуемая скорость воздушного потока в пневмотранспортной системе для движения частиц угля. Построена имитационная модель пневмотранспортной системы для бурения пневмоударником, на которой установлены зависимости скорости воздушного потока от параметров скважины и расхода воздуха. Проведена оценка эффективности транспортирования шлама для данной модели. Установлено, что при снижении расхода воздуха возрастает количество осаждаемых частиц, что увеличивает риск закупоривания скважины. Для предотвращения данного негативного фактора предложен способ повышения качества очистки скважины с помощью интервальной продувки. Показано, что при определенных параметрах пневмофорсунок и производительности компрессорной установки можно добиться расхода воздуха, достаточного для работы пневмоударника. Данный способ применим к имеющимся конструкциям буровых установок с минимальными изменениями буровых штанг. По введенным критериям определена эффективность предложенного способа. Таким образом, полученные результаты подтвердили возможность использования способа интервальной продувки горизонтальной скважины при бурении пневмоударником.

Ключевые слова: пневмотранспорт, частица, бурение, пневмоударник, шлам, скважина, продувка, шламотранспорт.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.066

Cheshchin Dmitry O.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Department of Mining
and Construction Geotechnics,
Institute of Mining n.a. N.A.Chinakal,
Siberian Branch of RAS,
630091 Novosibirsk, 54 Krasny Av.
e-mail: dimixch@mail.ru

JUSTIFICATION OF THE POSSIBILITY OF USING THE INTERVAL PURGE METHOD OF INTERVAL BLOWING WHEN DRILLING HORIZONTAL WELLS WITH AIR HAMMERS

Abstract:

The paper presents theoretical and experimental studies on determining the parameters of the pneumatic system when drilling horizontal wells with an air hammer with blowing. It considers the process of pneumatic transporting of particles in a vertical and horizontal well and determines the main negative factors affecting the movement of particles. According to known methods, the required air flow rate in the pneumatic transport system for the movement of coal particles was calculated. A simulation model of a pneumatic transmission system for drilling with an air hammer was built, on which the dependences of the air flow rate on the well parameters and air consumption were established. Evaluation of the efficiency of sludge transportation for this model has been carried out. We established that with a decrease in air consumption the amount of deposited particles increases, which increases the risk of clogging the well. To prevent this negative factor, a method is proposed to improve the quality of well cleaning using interval blowing. The study shows that with the certain parameters of the pneumatic injectors and the performance of the compressor unit it is possible to achieve an airflow sufficient for the operation of the pneumatic hammer. This method is applicable to existing drilling rig designs with minimal drill rod modifications. According to the criteria introduced, the effectiveness of the proposed method was determined. Thus, the results obtained confirmed the possibility of using the method of interval blowing of a horizontal well when drilling with an air hammer.

Key words: pneumatic transport, drilling, pneumatic hammer, sludge, well, blowdown, transportation of sludge.

Введение

В угольных шахтах с высоким содержанием метана одной из основных противо-выбросовых мер является предварительная дегазация пластов с использованием протяженных скважин. Основным фактором, влияющим на глубину и эффективность проходки скважины, является качественное удаление бурового шлама [1]. Известно, что при бурении мягких угольных пластов механический или гидравлический способ шламоудаления негативно влияет на устойчивость стенок скважины, что может приводить к аварийным ситуациям [2, 3].

Решением этой проблемы может служить применение способа удаления шлама сжатым воздухом. Вынос буровой мелочи осуществляется через кольцевое пространство между стенкой скважины и бурильной трубой, а сжатый воздух подается по бурильным трубам.

Бурение скважин пневмоударниками с продувкой получило широкое распространение при сооружении вертикальных скважин различного назначения. Механизм удаления разрушенной породы из вертикальной скважины потоком воздуха характеризуется тем, что вектор силы тяжести удаляемых породных частиц противоположен направлению воздушного потока, в результате чего частицы шлама постоянно находятся во взвешенном состоянии и не оседают на стенках скважины (рис. 1).

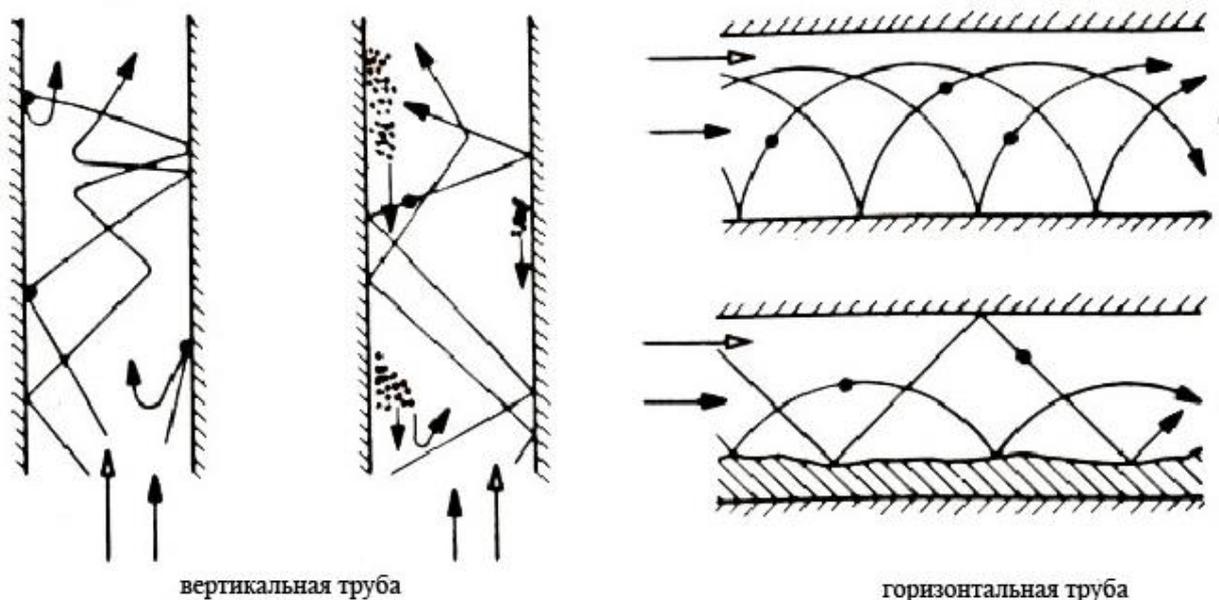


Рис. 1. Перемещение частиц шлама в вертикальной и горизонтальной скважинах

При выносе шлама продувкой из горизонтальной скважины вектор силы тяжести породных частиц направлен перпендикулярно к транспортирующему потоку. Вследствие этого периодически происходит оседание твердой фазы из потока на дно скважины. Неблагоприятная с аэродинамической точки зрения кольцевая форма поперечного сечения скважины дополнительно усугубляет эту проблему. В результате часть разрушенного породного материала в процессе транспортирования многократно переизмельчается, вдавливается в стенки скважины, что может быть причиной закупоривания скважины.

Механизм воздействия воздушного потока на транспортируемый материал в горизонтальном трубопроводе следующий (рис. 2).

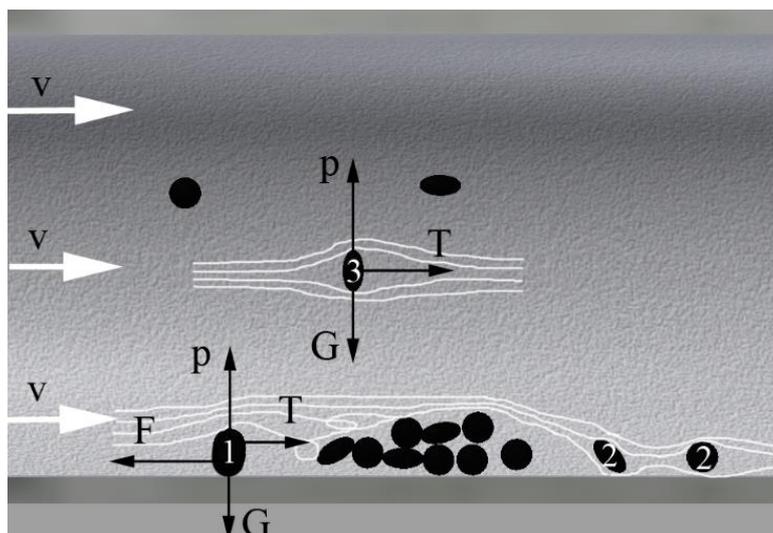


Рис. 2. Силы, действующие на частицу материала в горизонтальном трубопроводе

На частицу 1 , находящуюся на дне трубы в горизонтальном трубопроводе, действуют силы: вес частицы G , подъемная сила P , лобовое давление T и сила трения F [4].

При увеличении скорости воздуха v (белые линии) наступает момент, когда подъемная сила еще не оторвала частицу от дна трубы, а лобовое давление уже превысило силу трения, и частица 2 начинает перемещаться, скользя или перекатываясь по дну трубы. Дальнейшее увеличение скорости воздуха приводит к возрастанию подъемной силы, которая, преодолевая вес частицы, приподнимает ее с нижней части трубы. Частица движется вдоль оси трубы еще нестабильно, при этом скорость материала много меньше скорости воздуха. Последующее увеличение скорости воздуха приводит к еще большему увеличению подъемной силы. Частица 3 уже оказывается надежно взвешенной в воздушном потоке, совершает колебания по вертикали с малой амплитудой, не касаясь дна. Осевая скорость материала (вдоль трубы) увеличивается еще больше; начинается устойчивое движение частицы. При дальнейшем увеличении скорости воздуха скорость частицы также возрастает.

Минимальная скорость воздушного потока, обеспечивающая надежное транспортирование сыпучего материала по трубам, должна быть больше скоростей трогания и подъема, под которыми понимают, соответственно, скорость воздуха, при которой частица начинает скользить вдоль трубопровода, преодолевая силу трения и скорость воздуха, при которой частица отрывается от поверхности трубопровода [5, 6]. Для получения требуемой скорости потока необходим значительный расход воздуха, что и является основной причиной высокой энергоемкости таких систем пневмотранспорта.

При движении твердой частицы сверху вниз в восходящем потоке газа первоначально частица будет двигаться с ускорением. Такое движение будет наблюдаться до тех пор, пока сила тяжести не будет уравновешена аэродинамической силой давления воздуха P , после того частица перестанет двигаться. Эта скорость воздуха называется скоростью витания. Последняя является основным критерием, характеризующим аэродинамические свойства частиц, возможность их пневматического транспортирования.

Скорость витания является тем пределом скорости воздуха, при котором вертикальное транспортирование еще невозможно. Для устойчивого пневмотранспорта скорость потока должна быть выше скорости витания.

Экспериментальные исследования движения твердых частиц по горизонтальным трубопроводам показали, что нормальное транспортирование материала наблюдается при скорости, в среднем, на 100 % выше соответствующей скорости воздуха для вертикальных труб при одинаковых размерах труб и одинаковой подаче материала.

Определение основных параметров

Согласно известным методикам расчета пневмотранспортных систем [4, 8], произведем оценочный расчет возможности очистки скважины с помощью продувки воздухом при бурении пневмоударником.

В качестве исходных данных приняты:

- диаметр скважины, $D_c=0,093$ м;
- диаметр буровой колонны, $D_{бк}=0,055$ м;
- плотность твердой фазы, (уголь) $\rho_T=1300$ кг/м³;
- средняя скорость бурения $v_б=0,02$ м/с (1,2 м/мин);
- средний расход воздуха пневмоударника в режиме бурения $V_в=240$ м³/ч.

Для начала определим техническую производительность бурения, кг/ч:

$$Q_T = V_T \cdot \rho_T, \quad (1)$$

где V_T – производительность бурения, м³/ч.

$$V_T = 3600 \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot v_б / 4, \quad (2)$$

где $V_T = 3600 \cdot 3,142 \cdot 0,093^2 \cdot 0,02 / 4 = 489 \cdot 10^{-3}$ м³/ч. Тогда $Q_T = 489 \cdot 10^{-3} \cdot 1300 = 635,5$ кг/ч.

Определяем секундный расход воздуха:

$$Q_в = V_в \cdot \rho_в, \quad (3)$$

где $Q_в = 240 \cdot 1,2 = 288$ кг/ч.

Таким образом, весовая концентрация будет равна

$$\mu = 635,5 / 288 = 2,21 \text{ кг/кг.}$$

Надежно транспортирующую скорость воздуха рассчитывают по следующей методике. Вначале определяют скорость витания для вертикального участка:

$$v_б = Re \cdot \frac{v}{d}; \quad (4)$$

$$Re = \frac{Ar \cdot (1-\beta)^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot (1-\beta)^{4,75}}}; \quad (5)$$

$$Ar = \frac{d^3 \cdot g \cdot (\rho_T - \rho)}{\rho \cdot v^2}; \quad (6)$$

$$v = \frac{\mu^*}{\rho}, \quad (7)$$

где $v_б$ – скорость витания частицы в вертикальном участке трубопровода, м/с;

v – кинематическая вязкость газа при температуре транспортирования, м²/с;

μ^* – динамическая вязкость газа при температуре транспортирования, $2 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с;

d – эквивалентный диаметр частиц, м;

Ar, Re – критерии Архимеда и Рейнольдса;

β – объемная доля твердой фазы:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{\rho_T}{\mu \cdot \rho}}, \quad (8)$$

где $\beta = 0,002$;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

ρ – плотность газа при температуре транспортирования, кг/м³ (для воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³).

На основе анализа гранулометрического состава шлама, полученного в ходе промышленных испытаний, эквивалентный диаметр частиц принимаем $d = 0,001$ м.

Тогда критерии Архимеда и Рейнольдса будут иметь следующую величину: $Ar = 38071$; $Re = 276,4$.

В результате получим значения скорости витания частицы $v_б = 4,62$ м/с.

Надежно транспортирующая скорость воздуха для горизонтального пневмотранспорта равна

$$v = (3,5 \div 4) \cdot v_б; \quad (9)$$

$$v_n = (1,5 \div 3,5) \cdot v_б, \quad (10)$$

где $v = (16,17 \div 18,46)$ м/с; $v_n = (6,93 \div 16,17)$ м/с.

При скорости $v_{п}$ наблюдается неустановившееся перемещение частиц, при котором их транспортирование происходит посредством перекачивания по нижней части скважины.

На рис. 3 представлены графики среднего значения надежно транспортирующей скорости воздуха, скорости перекачивания и скорости витания частицы в скважине для эквивалентного диаметра частиц угля от 0,2 до 5 мм.

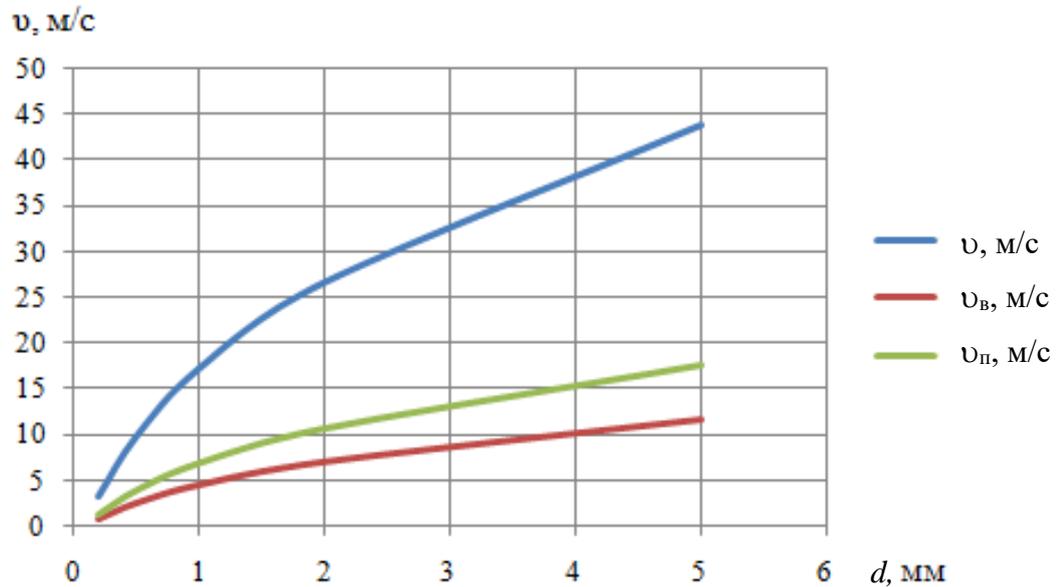


Рис. 3. Зависимости надежно транспортирующей скорости воздушного потока v , скорости перекачивания $v_{п}$ и скорости витания частицы $v_{в}$ от эквивалентного диаметра частиц угля d

Имитационное моделирование пневмосистемы при бурении пневмоударником

Для оценки скорости потока воздуха в скважине в программе SimulationX [9] была создана модель схемы пневмосистемы (рис. 4), состоящей из источника расхода воздуха ($qSource1$), буровых штанг с внутренним объемом (vol_rods) и сечением ($constThrottle1$), буровой коронки ($drillbit$), затрубного пространства ($machine$, $controlin$ и $borehole$) и устья скважины ($controlout$).

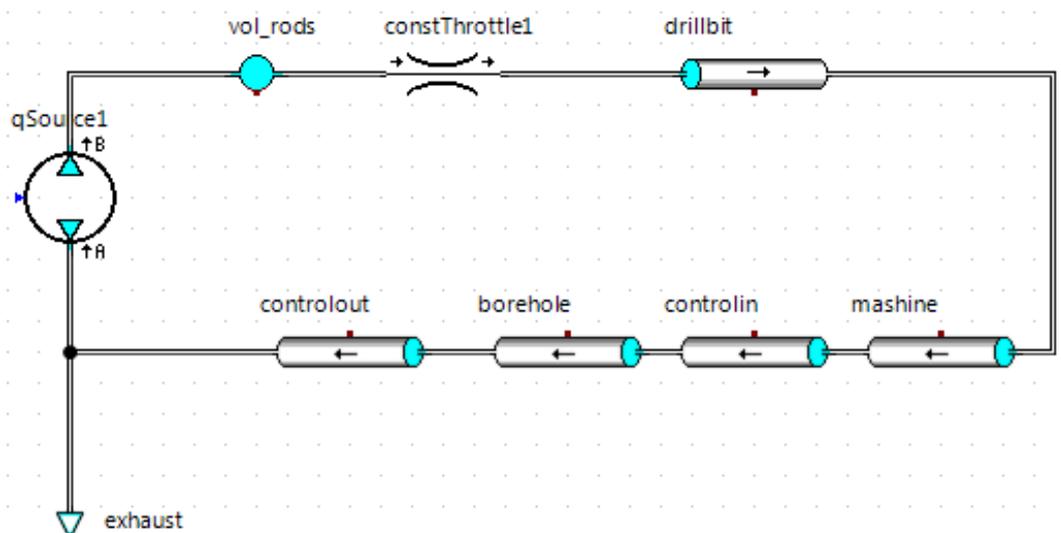


Рис. 4. Схема имитационной модели пневмосистемы

Длина скважины (borehole) принята равной 100 м, эквивалентный диаметр продувочного отверстия (drillbit) для применяемой PDC93 коронки – 24,3 мм.

Диаметр корпуса пневмоударника ПНБ93 (maschine) $D_{п}=82$ мм.

Так как скважина имеет форму кольца или полумесяца, то для модели введен эквивалентный диаметр скважины:

$$D = \sqrt{D_c^2 - D_{бк}^2}. \quad (11)$$

При диаметре скважины $D_c=93$ мм и диаметре буровой колонны $D_{бк}=55$ мм получаем $D=75$ мм.

На созданной имитационной модели был проведен ряд экспериментов с различными величинами расхода воздуха.

Скорость и расход воздуха определялся у забоя, корпуса пневмоударника и устья скважины на контрольных участках у забоя controlin и у устья controlout. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

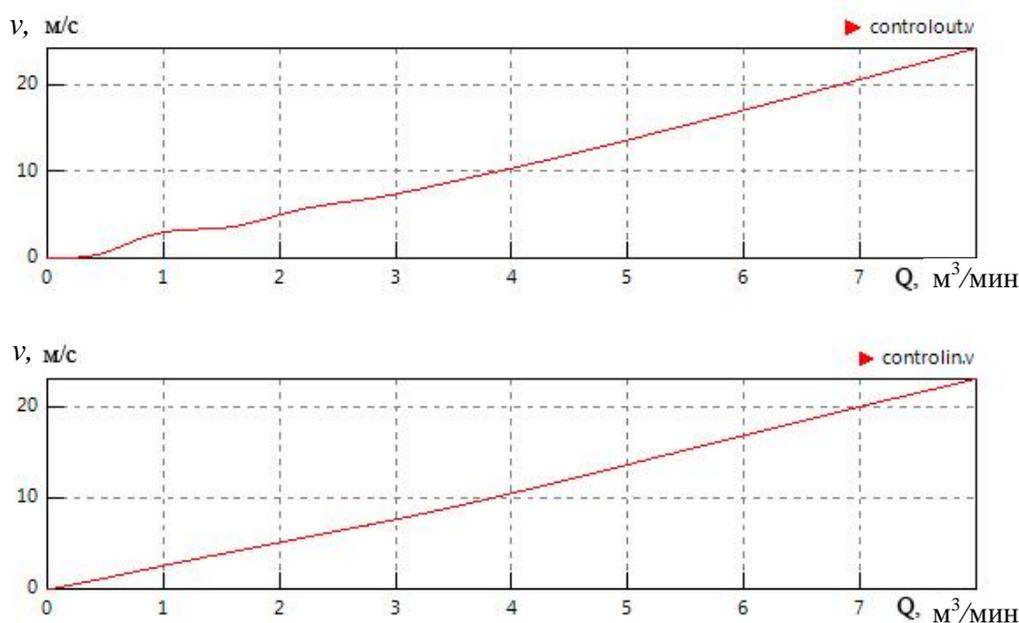


Рис. 5. Зависимость давления и скорости воздушного потока в скважине от расхода воздуха

Проведя сравнительный анализ полученных результатов, можно сделать вывод, что для скважины диаметром 93 мм с бурильной колонной диаметром 55 мм достаточная скорость воздушного потока величиной $v = (16,17 \div 18,46)$ м/с для надежного транспорта частиц $d=1$ мм обеспечивается при расходе воздуха около $Q = 6,5$ м³/мин. При этом более крупные фракции (до 5 мм) также перемещаются по скважине, однако перекачиванием и нестабильно.

Постановка проблемы при бурении горизонтальных скважин с продувкой и способ ее решения

При бурении горизонтальной скважины пневмоударником основной проблемой является критическое снижение расхода воздуха в пневмомагистрали и, соответственно, скорости потока (следствие утечек, подключения дополнительных потребителей и др.), что приводит к затруднению выноса шлама и закупорке кольцевого пространства скважины.

На рис. 6 представлена схема движения потока воздуха и частиц шлама при бурении пневмоударником.

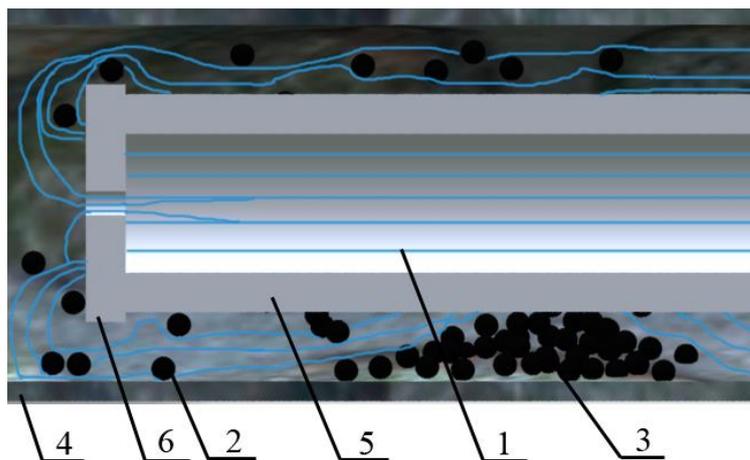


Рис. 6. Схема движения потока воздуха и частиц шлама при бурении пневмоударником:
1 – поток воздуха; 2 – частица шлама; 3 – осажденные частицы;
4 – скважина; 5 – буровая колонна; 6 – буровая коронка

Как видно из рисунка, при недостаточной скорости потока воздуха $1 v \leq 3,5 v_b$ движение частиц 2 происходит нестабильно и перекатыванием, что с большей вероятностью приводит к интенсивному их скапливанию в нижней части 3 скважины 4 вплоть до ее закупоривания.

В свое время подобная проблема решалась с использованием вращающегося шламопровода при сооружении горизонтальных скважин [10, 11]. Было установлено, что при вращении трубопровода обеспечивается наиболее эффективный вынос твердой фазы за счет того, что породные частицы находятся во взвешенном состоянии, скатываясь по стенке вращающейся трубы.

Аналогичным образом можно улучшить очистку скважины и при транспортировании шлама по затрубному пространству, обеспечивая постоянное поднятие частиц из нижней части скважины. Так можно исключить возможность ее закупоривания, обеспечить стабильный вынос шлама и увеличить скорость бурения, так как уменьшится время на дополнительную продувку скважины.

Поднятие частиц шлама с нижней части скважины можно производить механическим способом с помощью каких-либо рыхлителей-лопаток, так как буровая колонна постоянно вращается. Однако установка таких рыхлителей на колонне требует существенного внесения изменений в конструкцию штанг, что снижает надежность системы в целом. К тому же их установка приводит к нарушению геометрии скважины при долговременном вращении колонны без подачи на забой. Подобная модернизация должна быть достаточно трудоемкой для существующей технологии и оборудования.

Альтернативой рыхлителям-лопаткам может служить способ интервальной продувки скважины с помощью пневмофорсунок (рис. 7).

Сущность способа состоит в том, что по всей длине буровой колонны 4 через установленный интервал организованы отверстия 3 определенного диаметра (пневмофорсунки), соединяющие пневматический канал колонны 4 с внутренним пространством скважины 5. В таком случае подъем частиц 1 из нижней части скважины 5 обеспечивается напором воздуха 2 (обозначен линиями) из отверстий 3 колонны 4, а ее вращение позволяет напору воздействовать на всю периферию скважины 5. В результате концентрация частиц в воздушном потоке увеличивается, что позволяет повысить эффективность очистки скважины. При этом не требуется вносить существенных изменений в конструкцию имеющегося оборудования, а также отсутствует механическое воздействие на скважину, что сохраняет ее целостность.

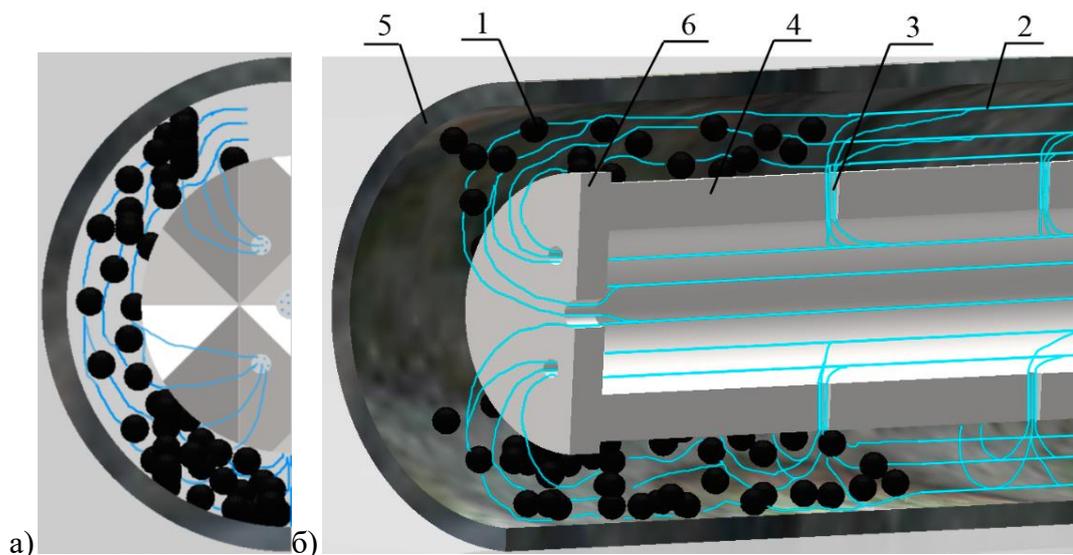


Рис. 7. Способ интервальной продувки скважины:

1 – частица шлама; 2 – поток воздуха; 3 – отверстие (пневмофорсунка); 4 – буровая колонна; 5 – скважина; 6 – буровая коронка; а – вид спереди; б – вид сбоку

Как было сказано, для получения достаточной скорости потока необходим определенный расход воздуха $Q_{пу}$, который требуется для устойчивой работы пневмоударника. Таким образом, необходимо оценить падение расхода воздуха (остаточный расход) перед буровой коронкой (пневмоударником) в зависимости от диаметра отверстий пневмофорсунок.

Для решения этой задачи была разработана имитационная модель, схема которой представлена на рис. 8.

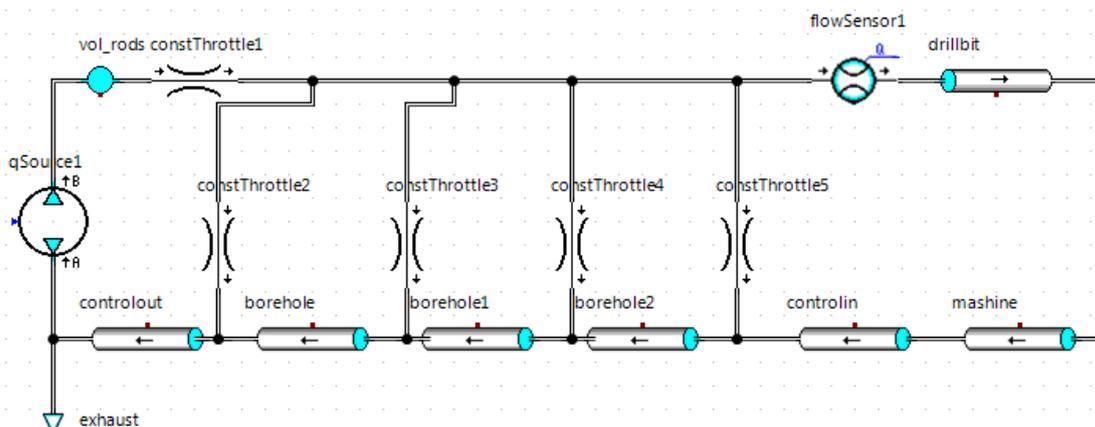


Рис. 8. Схема имитационной модели интервальной продувки скважины

Длина скважины составляла 100 м. Для упрощения схемы ее длина была разделена на 3 равные части (borehole, borehole1 и borehole2). Между этими частями скважины и контрольными участками (controlini controlout) были введены дроссели (constThrottle2, constThrottle3, constThrottle4 и constThrottle5), соединенные с буровой колонной и имитирующие выходы пневмофорсунок в скважину. Диаметр пневмофорсунок устанавливался в соответствующих элементах.

Источник расхода $qSource1$ подключен к буровой колонне с внутренним объемом vol_rods и сечением канала $constThrottle1$.

Для оценки остаточного расхода воздуха перед пневмоударником $drillbit$ установлен расходомер $flowSensor1$.

Элемент machine имитирует кольцевой зазор между скважиной и корпусом пневмоударника.

На модели были проведены исследования с интервалом между форсунками 2 м (50 штук) и 1 м (100 штук). На рис. 9 отражена полученная зависимость остаточного расхода воздуха $Q_{\text{ост}}$ от диаметра отверстия пневмофорсунок d_0 и магистрального расхода воздуха Q .

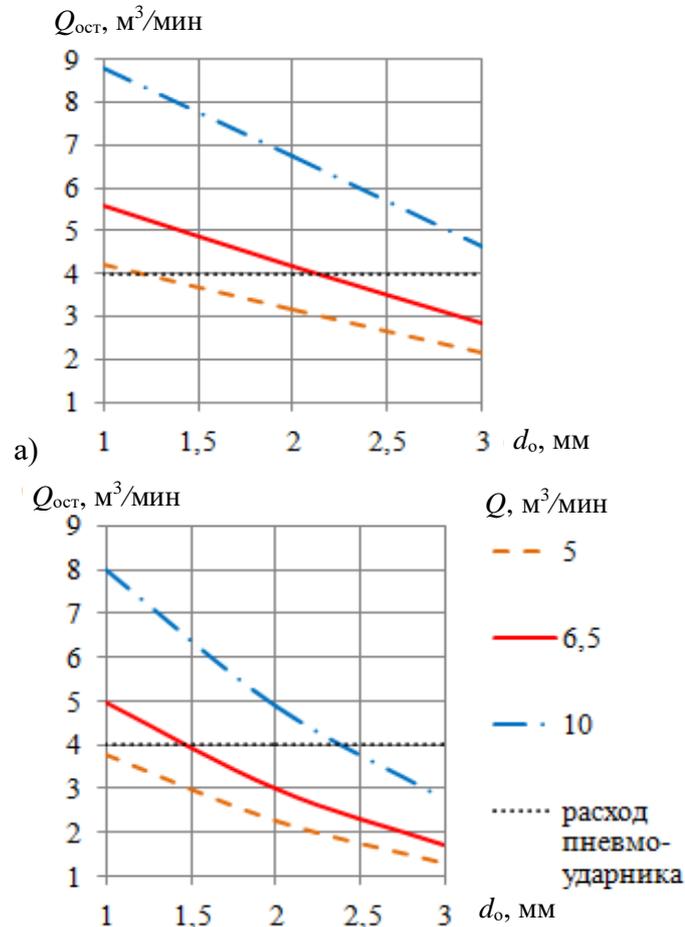


Рис. 9. Зависимость остаточного расхода воздуха $Q_{\text{ост}}$ от диаметра отверстия пневмофорсунок d_0 при различном магистральном расходе воздуха Q и для интервала отверстий пневмофорсунок: а – 2 м; б – 1 м

Анализ результатов и выводы

Ранее было определено, что расход воздуха для стабильного перемещения частиц при принятых начальных параметрах скважины должен составлять не менее $Q = 6,5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Критерием для анализа полученных данных также является расход воздуха, необходимый для стабильной работы пневмоударника. Так, для пневмоударника ПНБ-93 он составляет $Q_{\text{пу}} = 3,9 \div 4 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Как видно из графика «а» (см. рис. 9), при интервале между отверстиями 2 м и производительности пневмомагистрали $Q = 6,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ стабильная работа пневмоударника $Q_{\text{ост}} \geq Q_{\text{пу}}$ обеспечивается при диаметре отверстий пневмофорсунок $d_0 \leq 2 \text{ мм}$. При этом скорость воздушного потока на контрольном участке controlin (после корпуса пневмоударника) составляет 15 м/с и увеличивается по мере продвижения к устью скважины до 23 м/с, что гарантирует перемещение частиц диаметром до 3,5 мм. Увеличение производительности подачи воздуха до $10 \text{ м}^3/\text{мин}$ позволяет увеличить диаметр форсунок до 3 мм.

При интервале между отверстиями 1 м (рис. 9б) стабильная работа пневмоударника $Q_{\text{ост}} \geq Q_{\text{пу}}$ обеспечивается при диаметре отверстий ориентировочно $d_0 \leq 1,4$ мм, а рост производительности пневмомагистрала до 10 м³/мин увеличивает этот диаметр до 2,3 мм.

Таким образом, полученные результаты подтвердили возможность использования способа интервальной продувки горизонтальной скважины при бурении пневмоударником. Необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования на физической модели процесса пневмотранспорта твердых частиц для оценки эффективности данного способа.

Список литературы

1. Маметьев Л.Е., Хорешок А.А., Цехин А.М., Борисов А.Ю., 2018. Повышение эффективности бурения дегазационных скважин и транспортирования разрушенного угля. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 1, С. 106 – 112.
2. Yao, N., Yin, X., Wang, Y. et al., 2011. Practice and drilling technology of gas extraction borehole in soft coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, V. 3, Pp. 53 – 61.
3. Niu, G.-Q., Zhang, W., 2013. Study on critical air velocity and pressure loss of pneumatic coal dust removal for boreholes along coal seams. *China Safety Journal*, V. 23, No. 11, Pp. 60 – 65.
4. Данилов Б.Б., 2009. *Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу*: дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 246 с.
5. Войцеховский С.В., 2022. Влияние закрутки потока на коэффициент трения по длине при пневматическом транспортировании сыпучих материалов. *Вести автомобильно-дорожного института*, № 3, С. 7 – 12.
6. Волошин Е.В., 2019. *Расчет и компоновка пневмотранспортных установок: методические указания*. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 61 с.
7. Пономаренко С.Н., 2021. Математическая модель движения аэросмеси в рабочей зоне кольцевого эжектора пневмотранспортной системы. *Sciences of Europe*, № 65-1, С. 39 – 44.
8. Кантаев А.С., Брус И.Д., Тураев Н.С., 2015. *Расчет установок пневмотранспорта: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Оборудование производств редких элементов» для студентов IV курса, обучающихся по специальности 240501 Химическая технология материалов современной энергетики*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 28 с.
9. *Официальный сайт SimulationX*. URL: <http://www.simulationx.com/> (дата обращения: 16.11.2022)
10. Данилов Б.Б., 2007. Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 52 – 61.
11. Хан Г.Н., Русин Е.П., 2021. Численное моделирование процесса транспортирования породной массы по вращающемуся трубопроводу. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр. Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»*. Новосибирск: СГУГиТ, Т. 2, № 4, С. 141 – 150. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-141-150

References

1. Mamet'ev L.E., Khoreshok A.A., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu., 2018. Povyshenie effektivnosti bureniya degazatsionnykh skvazhin i transportirovaniya razrushennogo uglya [Improving the efficiency of drilling degassing wells and transportation of destroyed coal]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, № 1, P. 106 – 112.
2. Yao, N., Yin, X., Wang, Y. et al., 2011. Practice and drilling technology of gas extraction borehole in soft coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, V. 3, Pp. 53 – 61.
3. Niu, G.-Q., Zhang, W., 2013. Study on critical air velocity and pressure loss of pneumatic coal dust removal for boreholes along coal seams. *China Safety Journal*, V. 23, No. 11, Pp. 60 – 65.
4. Danilov B.B., 2009. Teoriya i praktika sozdaniya oborudovaniya dlya bureniya v grunte gorizontaľnykh skvazhin s pnevmotransportom razrushennogo materiala po vrashchayushchemusya truboprovodu [Theory and practice of designing equipment for drilling horizontal wells in the ground with pneumatic transport of the destroyed material through a rotating pipeline]: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Novosibirsk, 246 s.
5. Voitsekhovskii S.V., 2022. Vliyanie zakrutki potoka na koeffitsient treniya po dline pri pnevmaticheskom transportirovanii sypuchikh materialov [Effect of the flow twist on the friction coefficient along the length during the pneumatic transportation of bulk materials]. Vesti avtomobil'no-dorozhnogo instituta, № 3, P. 7 – 12.
6. Voloshin E.V., 2019. Raschet i komponovka pnevmotransportnykh ustanovok: metodicheskie ukazaniya [Calculation and layout of pneumatic transport installations: guidelines]. Orenburg: Orenburgskii gos. un-t, 61 p.
7. Ponomarenko S.N., 2021. Matematicheskaya model' dvizheniya aerosmesi v rabochei zone kol'tseвого ezhektora pnevmotransportnoi sistemy [Mathematical model of moving of aero-mixture in the working area of the annular ejector of a pneumatic transport system]. Sciences of Europe, № 65 – 1, P. 39 – 44.
8. Kantaev A.S., Brus I.D., Turaev N.S., 2015. Raschet ustanovok pnevmotransporta: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po kursu "Oborudovanie proizvodstv redkikh elementov' dlya studentov IV kursa, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 240501 Khimicheskaya tekhnologiya materialov sovremennoi energetiki [Calculation of pneumatic transport installations: methodological guidelines for performing laboratory work on the course "Equipment for the production of rare elements" for IV-year students studying in the specialty 240501 Chemical Technology of Materials of Modern Energy]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 28 s.
9. Ofitsial'nyi sait SimulationX [Official SimulationX website]. URL: <http://www.simulationx.com/> (data obra-shcheniya: 16.11.2022)
10. Danilov B.B., 2007. Povyshenie effektivnosti bestransheinykh sposobov podzemnogo stroitel'stva za schet primeneniya pnevmotransporta [Increasing the efficiency of trenchless methods of underground construction by pneumatic transport]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 5, P. 52 – 61.
11. Khan G.N., Rusin E.P., 2021. Chislennoe modelirovanie protsessa transportirovaniya porodnoi massy po vrashchayushchemusya truboprovodu [Numerical simulation of the process of transporting rock mass through a rotating pipeline]. Interekspo GEO-Sibir'. XVI Mezhdunar. nauch. kongr. Natsional'naya nauch. konf. "Nedropol'zovanie . Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Ekonomika. Geoekologiya'. Novosibirsk: SGUGiT, V. 2, № 4, P. 141 – 150. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-4-141-150