Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова.
1988. Т. 116

УДК 622.242.1

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Б.Б.КУДРЯШОВ, ЧАН ДИНЬ КИЕН

Расход промывочной жидкости – столь же важный параметр режима бурения, как осевая нагрузка и частота вращения бурового снаряда. Осложненные условия бурения предъявляют специфические требования к расходу жидкости. Например, в поглощающих породах расход следует по возможности повышать для надежной очистки забоя, в слабосвязных рыхлых породах – снижать для устранения размыва, обвалов, обрушений, предотвращения каверкообразования; в мерзлых породах расход промывочной жидкости определяется требованиями сохранения керна, устранения протаивания пород с потерей связности и устойчивости, предупреждения образования шуги и перемерзания ствола скважины при форсированных режимах бурения, в частности алмазного, требованиями достаточного охлаждения породоразрушающего инструмента и т.п.

В нормальных условиях бурения по устойчивым, монолитным породам также вполне правомочно ставить вопрос об оптимальном расходе очистного агента. В этом случае в качестве критерия оптимизации можно рассматривать минимум мощности на привод насоса. Эта мощность определяется произведением рабочего давления на объемную производительность насоса с учетом его механического КПД:

$$N = pV/\eta, \qquad (1)$$

где p – рабочее давление насоса, Па; V – объемная производительность насоса, $м^3/с$; η – КПД насоса.

Потери давления в циркуляционной системе скважины пропорциональны квадрату объемного расхода промывочной жидкости. Расход должен быть достаточным для надежного и устойчивого транспортирования шлама от забоя к устью скважины, что в общем случае определяется через скорость восходящего потока, обеспечивающую вынос наиболее крупной частицы шлама [2-4]:

$$v = u + w, \qquad (2)$$

где v – скорость восходящего потока, м/с; u – желаемая скорость транспортирования шлама, м/с; w – критическая скорость для наиболее крупной частицы шлама, м/с.

В основе многочисленных существующих методов расчета выноса шлама при бурении лежат известные закономерности движения шара в жидкой или газообразной среде (например, [2, 3]). Критическая скорость для шара (конечная скорость, скорость витания, гидравлическая крупность, die schwebegeschwindigkeit, sleep velocity)[x] может быть определена расчетом. Для этого предложено большое количество расчетных формул, графические и табличные методы. Большинство расчетных формул, в частности, широко применяемая в бурении формула П.Риттингера [2, 3, 7], грубо приближены и строго ограничены узкими интервалами значений параметра Рейнольдса

$$Re = d_0 w_0 / \nu , \qquad (3)$$

где d_0 – диаметр шара, м; w_0 – критическая скорость для шара, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкой или газообразной транспортирующей среды, м^2/с.

Эти приближенные способы определения критической скорости w для наиболее крупной частицы шлама вполне удовлетворяли требованиям инженерных расчетов до тех пор, пока учет влияния шлама на расход и давление промывочной жидкости оставался грубо приближенным. При жидкостной промывке, в отличие от продувки воздухом (газом) [2, 5], этот учет до настоящего времени заключался только в произвольном ограничении „объемной доли шлама" или „плотности раствора" в восходящем потоке, причем без учёта проскальзывания очистного агента относительно частиц шлама [2], или же в уточнении тем или иным способом коэффициента гидравлического сопротивления, в частности, с помощью понятия расходной концентрации шлама μ по выражению, применяемому в теории пневматического транспортирования [2, 4],

$$\lambda_{см} = \lambda_0 (1 + k_г \mu), \qquad (4)$$

где λ_0 и $\lambda_{см}$ – безразмерные коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно для потока чистой жидкости и потока смеси, транспортирующей шлам; $k_г$ – поправочный коэффициент Гастерштадта, не зависящий от концентрации шлама в потоке; μ – безразмерная расходная концентрация шлама в потоке.

Расходная концентрация

$$\mu = G_ш / G , \qquad (5)$$

где G и $G_ш$ – массовый расход соответственно промывочной жидкости и шлама, кг/с.

Для определения массового расхода шлама в случае бурения соответственно с отбором керна и без отбора керна служат формулы

---

[x] *Скорость равномерного падения в неограниченной покоящейся жидкой или газообразной среде или скорость восходящего потока этой среды, при которой сферическая частица находится в покое.*

$$G_{ш} = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - \frac{B}{100} d_к^2\right)\delta v_{мех} \qquad (6)$$

и

$$G_{ш} = \frac{\pi}{4} D^2 \delta v_{мех}, \qquad (6а)$$

где D и $d_к$ – соответственно диаметр скважины и керна, м; δ – плотность горной породы, кг/м^3; $v_{мех}$ – механическая скорость бурения, м/с; B – средний выход керна, %.

С помощью соотношений (4)–(6) при достоверном определении λ_0 и поправочного коэффициента $k_т$ с достаточной для практики точностью может быть учтено возрастание суммарных гидравлических потерь давления за счет наличия шлама, транспортируемого восходящим потоком промывочной жидкости от забоя к устью скважины. Однако этим не исчерпывается влияние шлама в потоке на суммарные потери давления в циркуляционной системе скважины. На самом деле находящийся в восходящем потоке шлам оказывает свое влияние также на гидростатическое давление. Давление насыщенного шламом столба жидкости в кольцевом канале не уравновешивается давлением чистой жидкости в бурильной колонне, и, следовательно, гидростатические давления восходящего и нисходящего потоков не могут нейтрализовать друг друга, что обычно предполагают при гидравлических расчетах бурящихся скважин, исходя из понятия сообщающихся сосудов.

Гидростатическое давление столба промывочной жидкости, насыщенной шламом, можно выразить следующим образом:

$$p_{ст} = \rho_{см} H, \qquad (7)$$

где $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м^3; H – превышение нивелирных уровней восходящего потока (глубина скважины по вертикали), м.

Плотность смеси в восходящем потоке, с учетом несжимаемости жидкости, для случая прямой циркуляции можно легко представить выражением

$$\rho_{см} = \frac{G}{F_2 v} + \frac{G_{ш}}{F_2 u_{ср}}, \qquad (8)$$

где F_2 – площадь сечения кольцевого канала, м^2; $u_{ср}$ – средняя скорость выноса шлама, м/с.

Отношение средней скорости выноса шлама к скорости движения транспортирующей его жидкости $\varepsilon = u_{ср}/v$ называют "коэффициентом проскальзывания". С учетом этого понятия действительную концентрацию шлама в потоке можно выразить соотношениями

$$\mu_{ж} = \frac{v}{u_{ср}} \frac{G_{ш}}{G} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{G_{ш}}{G}. \qquad (9)$$

При определении конкретных значений коэффициента проскальзывания ε или действительной концентрации $\mu_{ж}$ скорость восходящего потока жидкости v и расходная концентрация шлама $\mu = G_{ш}/G$ известны заранее.

Особую задачу представляет определение средней скорости транспортирования полидисперсного шлама $u_{ср}$, которая в каждом конкретном случае может быть определена из выражения (6)

$$u_{ср} = 100 \Big/ \int_0^{100} \frac{dm}{v - w}, \qquad (10)$$

где m - содержание в шламе частиц с размерами большими или равным d, %.

Значение интеграла (10) можно найти графическим интегрированием кривой $1/(v - w) = f(m)$, построенной по известным из опыта данным кривой полных остатков на ситах при гранулометрическом анализе шлама. Чтобы построить эти кривые, необходимо для каждой отдельной группы крупности шлама определить разность между известной скоростью восходящего потока жидкости v и критической скоростью w для частиц данной группы крупности, причем с учетом влияния их типичной формы, а также стесненности совместного движения и стесненности канала потока. Решение этой задачи возможно только с применением достаточно точной и справедливой в широком диапазоне значений Re зависимости для расчетного определения критической скорости шара.

В настоящее время наиболее удобной для указанных целей можно считать формулу критической скорости для шара [2, 7]

$$w_0 = \frac{\nu}{d_0} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln 10 Ar}}{\ln 10} - 1 \right) \qquad (11)$$

или

$$w_0 = \frac{\nu}{d_0} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right), \qquad (11a)$$

где Ar - параметр Архимеда, $Ar = \left[g d_0^3 (\delta - \rho) \right] / \rho \nu^2$; g - ускорение свободного падения, м/с^2.

Формула (11) получена на основе логарифмической интерполяционной зависимости между параметрами ϕRe^2 и Re (диаграмма П.В.Лященко) [2], позволившей найти наиболее простое и точное расчетное выражение для коэффициента сопротивления движению шара, что отмечено другими исследователями [1, 4].

Формула (11) справедлива для любой жидкой или газообразной среды при $Re = 0,5 \div 10^5$, отличается простотой и высокой точностью (среднее квадратичное значение относительной погрешности по классическим опытным данным Рэлея, положенным в основе «стандартной кривой», 4,13 %).

Критическая скорость реальных частиц шлама неправильной формы определяется с помощью соотношения

$$w = k_\phi w_0, \qquad (12)$$

где k_ϕ - коэффициент формы, принимаемый для частиц [2, 4, 7] компактной (изометрической) формы равным 0,7; удлиненной (продолговатой) формы - 0,6; плоской (пластинчатой) формы - 0,5.

Влияние стесненности совместного движения частиц шлама и стесненности кольцевого канала может быть аналогично учтено с помощью поправочных коэффициентов соответственно $k_{ст}$ и $k_к$ [2, 4, 5].

Использование приведенных выше зависимостей дает возможность аналитического подхода к оценке оптимального расхода и давления промывочной жидкости с учетом влияния шлама в восходящем потоке.

Рассмотрим бурящуюся скважину с постоянными сечениями ствола и бурильной колонны при прямой циркуляции промывочной жидкости. Для простоты будем пренебрегать местными потерями давления в долоте или колонковом наборе, имея в виду, что все не принятые здесь во внимание второстепенные факторы легко могут быть учтены при гидравлических расчетах в любом конкретном случае.

В рамках принятых допущений для суммарных потерь давления в циркуляционной системе скважины справедливо

$$P_{общ} = \lambda_1 \frac{G^2}{2\rho d_1 F_1^2} L + \lambda_2 (1 + k_т \mu) \frac{G^2}{2\rho D_э F_2^2} L + g \rho \mu_ж L \sin\alpha , \qquad (13)$$

где d_1 – внутренний диаметр бурильной колонны, м; $D_э$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала, $D_э = D - d_2$; D и d_2 – соответственно диаметр скважины и наружный диаметр бурильной колонны, м; F_1 и F_2 – площадь сечения соответственно канала бурильной колонны и кольцевого канала, м^2; L – длина ствола скважины, м; α – угол наклона скважины, град.; индексы I и 2 относятся соответственно к нисходящему и восходящему потокам.

Для дальнейшего анализа необходимо найти хотя бы приближенное математическое выражение для действительной концентрации $\mu_ж$. Рассмотрим в этих целях конкретный пример.

При бурении скважины в окремненных известняках в районе г.Кизела трехшарошечным долотом ЛВ6аТ Верхнесергиевского завода была взята проба шлама массой 0,5 кг. На основе ситового анализа пробы определен гранулометрический состав шлама:

Размеры фракции, мм	5	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25
Содержание, %	63	18,4	20,1	10,7	5,3	4,5	34,7

Для определения средней скорости движения шлама при заданной скорости восходящего потока промывочной жидкости необходимо построить кривую зависимости $1/(v - w)$ от полных остатков на сите m. Для этого по формуле (II) сначала вычисляют значения критической скорости w_0 для сферических частиц, по диаметру равных размеру ячеек соответствующих сит. Затем по формуле (I2) определяется критическая скорость для реальных частиц шлама.

При определении средней скорости движения шлама $u_{ср}$ в данном случае примем: промывочная жидкость – вода; ρ = 1000 кг/м^3; ν = = 1,10·10^{-6} м^2/с при температуре 20 °С; скорость восходящего потока v

принимаем равной 0,4; 0,5 и 0,6 м/с; плотность породы δ = 2600 кг/м^3; частицы шлама в основном компактной (изометрической) формы; $k_ф$ = 0,7; максимальный диаметр частиц шлама d = 6·10^{-3} м. Влиянием стесненности совместного движения и стесненности кольцевого канала пренебрегаем, поэтому $k_{ст}$ = I; $k_к$ = I. Результаты расчетов следующие:

Размер ячейки, мм	0,25	0,50	1,0	2,0	3,0	5,0	6,0
Полный остаток на сите m, %	65,3	60,8	55,1	44,8	24,7	6,30	—
w_0, м/с	0,084	0,773	0,151	0,266	0,353	0,486	0,545
$w = 0{,}7\, w_0$, м/с	0,024	0,064	0,106	0 186	0,247	0,341	0,382
$\frac{1}{v-w}$, с/м при:							
v_1 = 0,4 м/с	2.657	2,891	3,401	4,673	6,536	16,85	55,56
v_2 = 0,5 м/с	2.099	2,242	2,538	3,185	3,953	6,289	8,474
v_3 = 0,6 м/с	1,735	2,024	2,024	2,416	2,833	3.891	4,587

При анализе графических изображений зависимости $I/(v - w) = f(m)$ (рис.I) видно, что все кривые, построенные по данным гранулометрического состава, приближенно описываются формулой вида

$$\frac{1}{v-w} = \frac{1}{v-w_{max}}\left(1 - am^b\right), \qquad (I4)$$

где w_{max} - критическая скорость частицы шлама максимального диаметра; a и b - эмпирические коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от гранулометрического состава разбуриваемых пород и от скорости восходящего потока.

Значения a следует принимать тем меньшими, а b - тем большими, чем выше скорость восходящего потока. Для нашего конкретного примера выражение (I4) принимает вид

при v_1 = 0,4 м/с $\quad \frac{1}{v-w} = 55{,}56(I - 0{,}586m^{0,II4})$;

при v_2 = 0,5 м/с $\quad \frac{1}{v-w} = 8{,}474(I - 0{,}I4Im^{0,382})$;

при v_3 = 0,6 м/с $\quad \frac{1}{v-w} = 4{,}587(I - 0{,}07m^{0,499})$.

Подставляя (I4) в (I0), после преобразования имеем

$$u_{ср} = \frac{1}{a_1}\left(v - w_{max}\right). \qquad (I5)$$

Из выражений (9) и (I5) для действительной концентрации шлама в восходящем потоке после преобразований получим

$$\mu_* = \frac{a_1}{G - \rho F_2 w_{max}}, \qquad (I6)$$

где $a_1 = 1 - a100^{b}/(b+1)$.

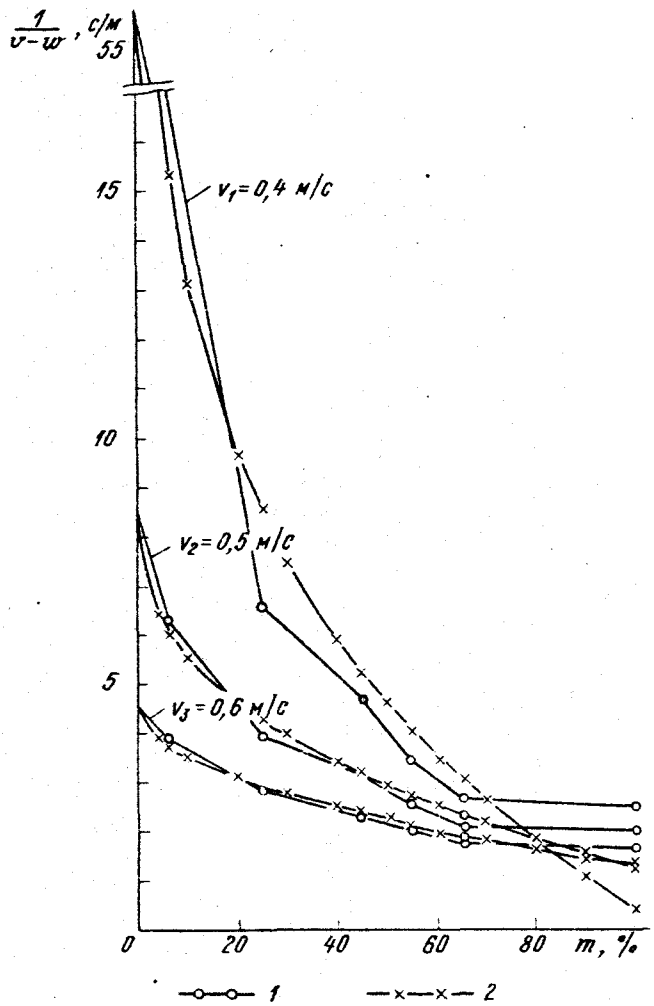


Рис.1. Зависимость $1/(v-w)=f(m)$
1 – по практическим данным; 2 – по формуле (14)

Подставив (16) в (13), получим

$$P_{общ}=\lambda_1\frac{G^2}{2\rho\alpha_1F_1^2}L+\lambda_2(1+k_r\mu)\frac{G^2}{2\rho D_э F_2^2}L+g\rho\frac{a_1G_ш}{G-\rho F_2 w_{max}}L\sin\alpha. \quad (17)$$

При гидравлических расчетах бурящихся скважин в большинстве случаев приходится иметь дело с турбулентным режимом. Следует учитывать, что дополнительную турбулизацию потока создают вращение и колебание бурильной колонны, что не учитывается существующими формулами. Поэтому для определения коэффициента гидравлического сопротивления λ практически всегда можно пользоваться при промывке водой формулой Блазиуса

$$\lambda = 0{,}3164/\sqrt[4]{Re}, \qquad (18)$$

где Re – число Рейнольдса.

Для нисходящего и восходящего потока соответственно

$$Re_1 = v_1 d_1/\nu \quad \text{и} \quad Re_2 = v_2 D_э/\nu. \qquad (19)$$

С помощью выражений (17)–(19) для суммарных потерь давления получим

$$P_{общ} = \frac{0{,}3164}{2}\rho^{-3/4}\nu^{1/4}\left[F_1^{-7/4}d_1^{-3/4} + F_2^{-7/4}D_э^{-3/4}\right]L G^{7/4} +$$

$$+ \frac{0{,}3164}{2}k_г\rho^{-3/4}F_2^{-7/4}D_э^{-5/4}\nu^{1/4}G_ш L G^{3/4} + g\rho\frac{a_1 G_ш}{G - \rho F_2 w_{max}}L\sin\alpha. \qquad (20)$$

Из анализа уравнения (20) следует, что зависимость $P_{общ} = f(G)$ имеет четко выраженный минимум. Возьмем первую производную $dP_{общ}/dG$ от выражения (20) и, приравняв ее нулю, после преобразований окончательно получим

$$AG^3 + BG^2 + CG + DG^{1/4} + E = 0, \qquad (21)$$

где $A = 0{,}27685\rho^{-3/4}\nu^{1/4}\left[F_1^{-7/4}d_1^{-3/4} + F_2^{-7/4}D_э^{-5/4}\right]$;

$$B = 0{,}1582\rho^{-3/4}\nu^{1/4}\left[\frac{3}{4}k_г G_ш F_2^{-7/4}D_э^{-5/4} - \frac{7}{2}\rho F_2 w_{max}\left(F_1^{-7/4}d_1^{-5/4} + F_2^{-7/4}D_э^{-5/4}\right)\right];$$

$$C = 0{,}0791\rho^{1/4}\nu^{1/4}w_{max}\left[\frac{7}{2}\rho F_2^2 w_{max}\left(F_1^{-7/4}d_1^{-5/4} + F_2^{-7/4}D_э^{-5/4}\right) - 3k_г F_2^{-5/4}G_ш D_э^{-5/4}\right];$$

$$D = -a_1 g\rho G_ш \sin\alpha;$$

$$E = 0{,}11856 k_г \rho^{5/4}F_2^{1/4}D_э^{-3/4}\nu^{1/4}w_{max}^2 G_ш.$$

При решении уравнения (21) на ЭВМ можно найти значения оптимального расхода жидкости при условии минимальных потерь давления в циркуляционной системе скважины.

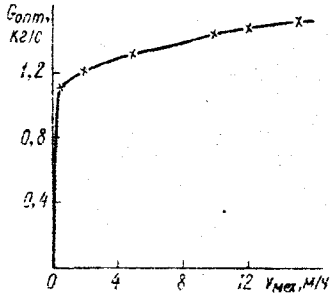


Рис.2. Расчетная зависимость $G_{опт} = f(v_{мех})$

В качестве конкретного примера с использованием приведенных выше данных по шламу рассмотрим следующий случай. Скважина бурится вертикально шарошечным долотом диаметром 76 мм с промывкой водой. Применяются бурильные трубы типа МЗ-50, $d_1 = 39$ мм, $d_2 = 50$ мм. Глубина скважины $L = 1000$ м. При расчетах принимаем $k_г = 1$; $k_{ст} = 1$; $k_к = 1$; постоянный коэффициент в формуле (16) $a_1 = 0{,}4075$.

Результаты расчета значений оптимального расхода воды в зависимости от механической скорости проходки следующие (рис.2):

$v_{мех}$, м/ч	0,5	2	5	10	12	15
$v_{мех}$, 10^{-3} м/с	0,139	0,556	1,389	2,778	3,333	4,167
G, кг/с	1,1004	1,2005	1,3102	1,4271	1,4638	1,5128

Зависимость суммарного давления $P_{общ}$ от массового расхода жидкости G, вычисленная в условиях рассматриваемого примера по формуле (20), представлена графически на рис.3. Графики показывают при значениях механической скорости бурения $v_{мех}$ от 0,5 до I5 м/ч наличие минимума суммарного давления. Конкретные значения массового расхода жидкости, которым соответствуют минимальные значения суммарного давления, можно для каждой механической скорости считать оптимальными в данных условиях.

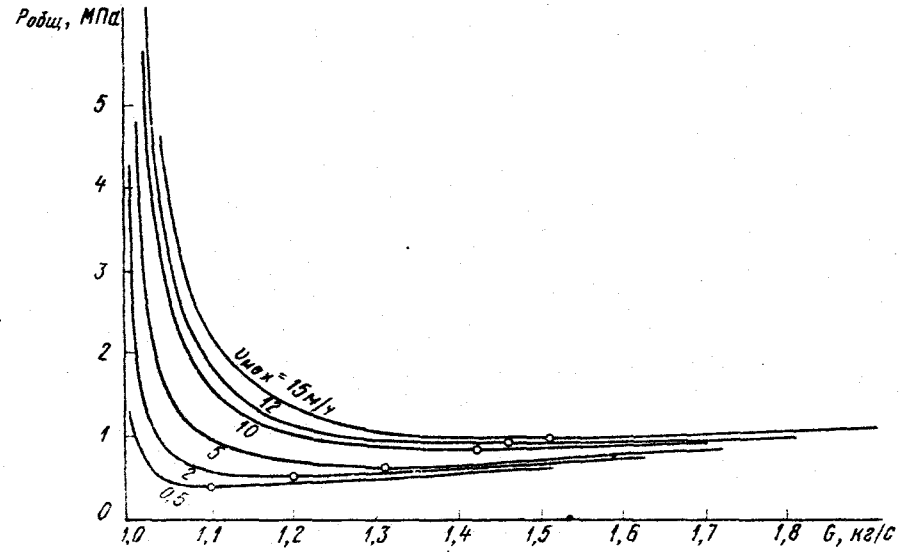


Рис.3. Расчетная зависимость $P_{общ} = f(G)$
o - точки минимума

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках. Киев: Наукова думка, 1972. 172 с.

2. Кудряшов Б.Б. Исследование и расчет режима воздухоснабжения при бурении скважин с продувкой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Ленингр. горный ин-т. Л., 1963. 19 с.

3. Маковей Н. Гидравлика бурения. М. : Недра, 1986. 536 с.

4. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения. М. : Недра, 1985. 200 с.

5. Перетолчин В.А. Расчет параметров и показателей работы пневмотранспортных систем буровых станков / Иркутск. политехн. ин-т. Иркутск, 1982. 80 с.

6. Телетов С.Г., Зверев Н.И. Методика расчета пневмотранспорта // Вестник техн. инфо м. Л. : ОНТИ, 1938. С. 16-18.

7. Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.Б. Технология и техника разведочного бурения. М. : Недра, 1983. 565 с.