

УДК 622.24:622.143

UDC 622.24:622.143

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА БУРОВОГО РАСТВОРА НА ПРОЦЕСС БУРЕНИЯ. СЛУЧАЙ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ**EFFECT OF FLOW OF MUD ON DRILLING PROCESS. THE CASE OF THE NEWTONIAN FLUID**

Чередниченко Владимир Георгиевич
ст. преподаватель

Tsouprikov Aleksandr Aleksandrovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Цуприков Александр Александрович
к.т.н., доцент

Cherednichenko Vladimir Georgievich
senior lecturer

Крицкая Лидия Михайловна
к.т.н., доцент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Kritskaja Lidiya Mikhailovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
Kuban state technology university, Krasnodar, Russia

Рассмотрены физические процессы, возникающие при удалении выбуренной породы с забоя скважины. Получена кривая седиментации, позволяющая определять вертикальную скорость транспортировки шлама при очистке забоя ньютоновскими жидкостями – воздухом и водой. Выведена формула для расчёта расхода бурового раствора, необходимого для качественной очистки забоя скважины при промывке водой или воздухом

Physical processes, arising up at removing of rock from the backwall of mining hole, are considered. The curve of sedimentation, allowing to determine the rate of climb of transporting of rock at cleaning of backwall with newtonian liquids – air and water, is shown. The formula is shown out for the calculation of expense of borax solution, necessary for the high-quality cleaning of backwall of mining hole at washing water or air

Ключевые слова: ПРОМЫВКА СКВАЖИНЫ, ОЧИСТКА ЗАБОЯ, НЬЮТОНОВСКАЯ ЖИДКОСТЬ

Keywords: WASHING OF MINING HOLE, CLEANING OF BACKWALL, NEWTONIAN LIQUID

Для удаления выбуренной породы в колонну труб закачивается буровой раствор с расходом Q ($\text{м}^3/\text{с}$), который, проходя через отверстия в долоте, выносит частицы шлама с забоя и транспортирует их во взвешенном состоянии по кольцевому пространству скважины. В буровой практике применяются промывочные жидкости с различными реологическими свойствами. В настоящей работе рассматривается наиболее критичный по отношению к скорости течения случай *ньютоновской жидкости*. К этому виду жидкостей относятся все буровые жидкости, обладающие свойством *текучести*, для которых пороговое напряжения сдвига равно нулю. Сюда же следует отнести и газошламовую смесь в случае бурения с продувкой. В дальнейшем, для жидкости, равно как и для газа, будем применять используемый в гидродинамике термин *жидкость*. В ньютоновской жидкости отсутствует *структурный* режим течения, и транспортировка частиц в

вертикальном направлении осуществляется за счет превышения местной скорости жидкости (т.е. скорости в окрестности частицы) над скоростью ее транспортировки на величину v_0 . В неподвижной жидкости v_0 - это установившаяся скорость оседания частицы, в связи с чем, будем называть эту величину *скоростью седиментации*. Указанное превышение обеспечивает требуемую силу увлечения (силу сопротивления) F_c , которая компенсирует *гравитационную силу* F_g (т.е. равнодействующую сил тяжести и Архимеда). Если жидкость движется вверх со скоростью v_0 , то скорость транспортировки относительно скважины равна нулю, частица «витает» в потоке жидкости, поэтому, указанную скорость называют также *скоростью витания* [1]. Из сказанного следует, что скорость седиментации определяет скорость транспортировки частицы вдоль скважины и является одним из основных параметров рассматриваемого процесса.

Рассмотрим установившееся движение частицы в неподвижной жидкости - рисунок 1.

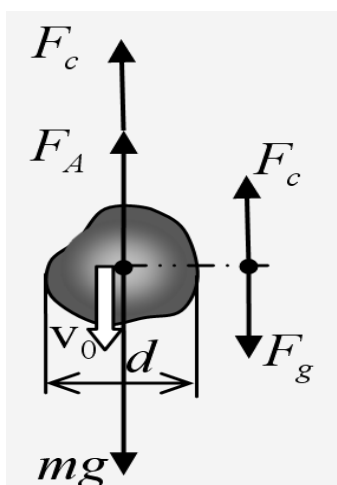


Рисунок 1. Силы, действующие на частицу

В этом случае, сила сопротивления уравнивается гравитационной силой:

$$F_c = F_g = mg - F_A = V(\rho - \rho_{ж})g, \quad (1)$$

где: V – объем частицы, ρ – плотность частицы, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Сила сопротивления зависит от размера частицы d , ее формы и ориентации в пространстве, плотности жидкости $r_{ж}$, ее вязкости m , скорости движения частицы v_0 и режима обтекания жидкостью частицы (ламинарный или турбулентный). Что касается формы частицы и ориентации в пространстве, то, поскольку отсутствует возможность их детального учета, будем рассматривать «усредненную частицу» – шар диаметра d и плотности r .

Согласно теории размерности[2], из пяти параметров задачи $F_c, d, r_{ж}, m, v_0$, имеющих три независимых размерности L – длина, M – масса, T – время, можно составить только два безразмерных комплекса. Один из возможных выборов – числа Эйлера и Рейнольдса:

$$Eu = \frac{F_c}{r_{ж} d^2 v_0^2}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{v_0 d r_{ж}}{m} = \frac{v_0 d}{n}, \quad (3)$$

где $n = \frac{m}{r_{ж}}$ – кинематическая вязкость. Согласно π -теореме теории размерностей [2], общая структура искомой зависимости имеет следующий вид: $Eu = f(Re)$ с универсальной для всех тел подобной формы функцией f . Для тел простейшей формы эта функция хорошо изучена экспериментально. На рисунке 2 представлены экспериментальные данные и построенная по ним гладкая кривая для шара. Здесь вместо зависимости $Eu(Re)$ приводится зависимость для коэффициента увлечения C_w ,

где

$$C_w = \frac{F_c}{r_{ж} \frac{\rho d^2}{8} v_0^2} = \frac{8Eu}{\rho}. \quad (4)$$

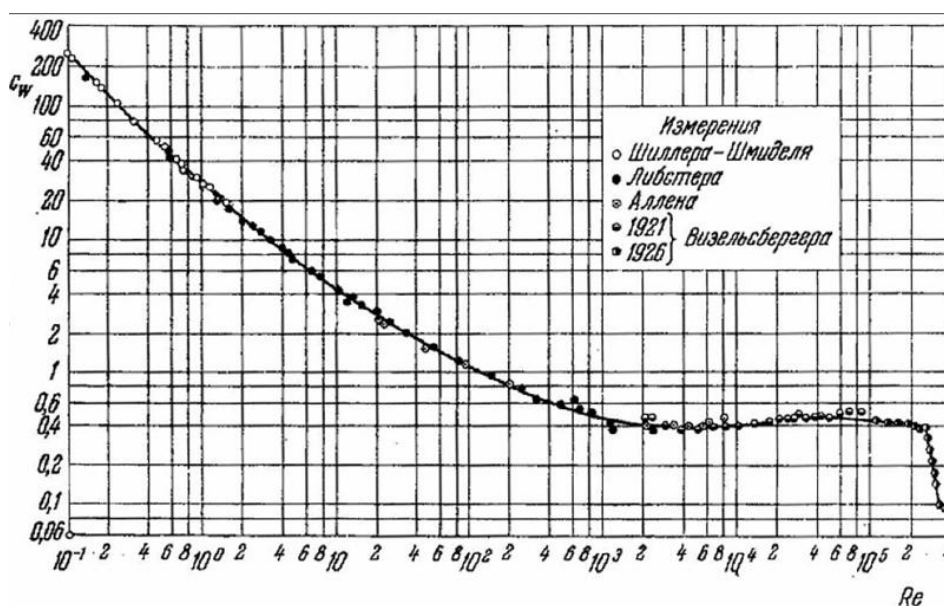


Рисунок 2. Зависимость коэффициента увлечения C_w от числа Рейнольдса $Re = \frac{rvd}{m}$ для шара [3].

Подставим в (4) выражение для силы сопротивления (1):

$$C_w = \frac{4}{3} \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right) \frac{gd}{v_0^2} \quad (5)$$

Несмотря на то, что функция $C_w = f(Re)$ однозначно устанавливает связь между всеми физическими величинами, влияющими на процесс седиментации, она не позволяет явно выразить искомую величину v_0 через независимые параметры задачи, поскольку v_0 содержится в обоих безразмерных комплексах. Поэтому от этих комплексов следует перейти к другим, выбранным таким образом, чтобы искомая величина присутствовала только в одном из них. Оставим в качестве зависимой безразмерной величины число Рейнольдса: $Y = Re$ и представим независимую величину в виде степенного одночлена $X = g Re^a C_w^b$, где g – положительный коэффициент, a и b – рациональные числа. Подставляя соответствующие выражения, получаем: $X = g \left(\frac{4}{3} \right)^b v_0^{a-2b} d^{a+b} n^{-a} \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right)^b$. В этом выражении скорость v_0 должна отсутствовать, откуда получаем условие: $a - 2b = 0$. Два других

условия выберем так, чтобы формула для X выглядела «наиболее просто». Пусть степень d и численный коэффициент $g \cdot (4/3)^b$ будут равны единице: $g = (3/4)^b$; $a + b = 1$. Решая полученную систему, находим: $a = 2/3$, $b = 1/3$, откуда приходим к выражению:

$$X = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \text{Re}^2 C_w} = d \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{r}{r_{\text{жс}}} - 1\right) g}{n^2}}. \quad (7)$$

Выясним физический смысл независимого и зависимого безразмерных параметров. Любой безразмерный комплекс Z можно представить как отношение размерного параметра z , входящего в его состав, к некоторому базовому значению этого параметра z_m , выбранного в качестве масштаба соответствующей величины: $Z = \frac{z}{z_m}$. Как известно, сила сопротивления обусловлена вязкими, и инерционными силами, имеющими различную физическую природу. Вязкие силы обусловлены переносом импульса от более быстрых слоев к менее быстрым, за счет диффузии молекул. Инерционные силы обусловлены переносом импульса отрывающимися вихрями. Число Рейнольдса Re характеризует отношение вязких сил к инерционным [4]. Следовательно,

$$Y = \text{Re} = \frac{v_0}{v_m}, \text{ где } v_m = \frac{n}{d}, \quad (8)$$

что означает *такую скорость тела, при которой вязкие и инерционные силы имеют одинаковый порядок*. Приравняем теперь гравитационную силу (1) и вязкую силу, описываемую законом Стокса при условии $\text{Re} = 1$:

$\frac{\rho d^3}{6} (r - r_{\text{жс}}) g = 3\rho d m v = 3\rho n^2 r_{\text{жс}}$, откуда находим размер тела, удовлетворяющий указанному условию: $d = \sqrt[3]{18n^2 / (r/r_{\text{жс}} - 1) g}$, что с точностью до числового множителя совпадает с делителем d в выражении (7). Таким образом,

$$X = \frac{d}{d_m}, \quad \text{где } d_m = \sqrt[3]{\frac{n^2}{\left(\frac{r}{r_{жс}} - 1\right)g}} \quad (9)$$

означает такой размер погружающегося под действием гравитационных сил тела, при котором вязкие и инерционные силы имеют одинаковый порядок. Назовем зависимость $\frac{v_0}{v_m} = f\left(\frac{d}{d_m}\right)$ седиментационной кривой.

Из формулы (7) следует, что опорные (реперные) точки седиментационной кривой могут быть получены из экспериментальных точек $(Re_k, C_{w k})$, представленных на рис. 2 следующим образом:

$$(X_k, Y_k) = \left(\sqrt[3]{\frac{3}{4} C_{w k} \cdot Re_k^2}, Re_k \right). \quad (10)$$

На рис. 3 приведены реперные точки, пересчитанные с помощью этой формулы из экспериментальных точек, которые были получены путем компьютерной оцифровки графика рис. 2. По этим точкам с помощью метода наименьших квадратов построена 5-членная аппроксимирующая функция:

$$Y = 10^{\sum_{n=1}^5 c_n \lg^{n-1} X} \quad (11)$$

с коэффициентами, приведенными в таблице 1. График этой седиментационной функции также приведен на рисунке 3.

Таблица 1. КОЭФФИЦИЕНТЫ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

n	1	2	3	4	5
c_n	-1.240521	3.0758209	-0.469400	0.0062685	0.009861

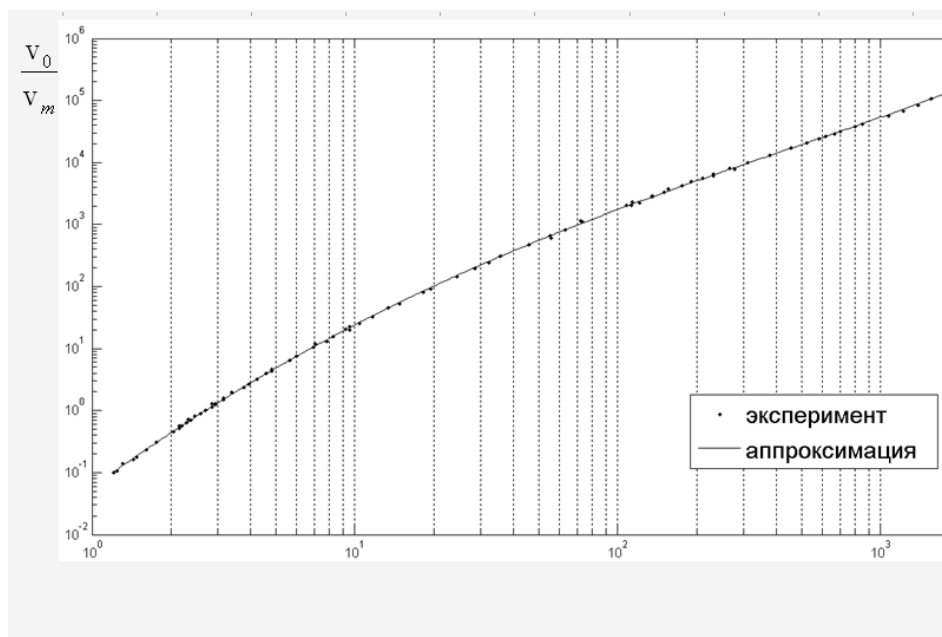


Рисунок 3. Экспериментальные точки и график седиментационной кривой, построенный по 5–членной аппроксимации (11). Выражения для v_m и d_m приведены в (8), (9).

Следует отметить, что реальные частицы шлама отличаются от идеализированных сферических частиц, поэтому формула (10) нуждается в уточнении, которое может быть получено экспериментальным путем. Однако в отсутствие экспериментальных данных можно пользоваться этой формулой «в первом приближении». Поскольку реальные частицы имеют неправильную форму, то более подходящим параметром будет являться объем частицы V или ее приведенный диаметр $d = \sqrt[3]{6/pV}$.

Кроме того, поскольку реальные частицы имеют неправильную форму и в процессе седиментации случайно ориентируются в пространстве, искомая функция будет иметь статистический характер.

Приведем три примера использования формулы (11):

Пример 1. Определить седиментационную скорость v_0 при продувке скважины воздухом. Исходные данные приведены в [5]: Вязкость воздуха $m = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотность воздуха $r_{жс} = 1,2 \text{ кг} / \text{м}^3$, плотность шлама $r = 2700 \text{ кг} / \text{м}^3$, эквивалентный диаметр шлама $d = 0,0014 \text{ м}$. По формулам

(8), (9) находим: $v_m = 0,01 \text{ м/с}$, $d_m = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $X = \frac{d}{d_m} = 64,5$. По формуле (11)

вычисляем: $Y = 4,58$; $v_0 = v_m \cdot Y = 4,58 \text{ м/с}$.

Пример 2. Рассмотрим ту же задачу, но с диаметром частицы в десять раз большим: $d = 0,014 \text{ м}$. В этом случае v_m, d_m остаются теми же; $X = 645$; По формуле (11) находим $Y = 1,58 \cdot 10^4$, откуда $v_0 = 167,8 \text{ м/с}$, что значительно больше предыдущей скорости.

Пример 3. Рассмотрим случай, отличающийся от предыдущего тем, что промывка осуществляется водой: $m = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$,

$r_{ж} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $r = 2700 \text{ кг/м}^3$, $d = 0,014 \text{ м}$. В этом случае,

$v_m = 7,14 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, $d_m = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, $X = \frac{d}{d_m} = 357,6$,

$Y = 6,6 \cdot 10^3$, $v_0 = v_m \cdot Y = 0,47 \text{ м/с}$, откуда следует, что вода обладает гораздо более высокими транспортными свойствами, чем воздух.

Перейдем к оценке необходимого расхода промывочной жидкости. Рассмотрим призабойный объем скважины в системе отсчета, относительно которой он неподвижен. Этот объем ограничен внутренним сечением трубы S_1 , сечением забоя S_2 , кольцевым сечением скважины S_3 и боковой поверхностью – рисунок 4.

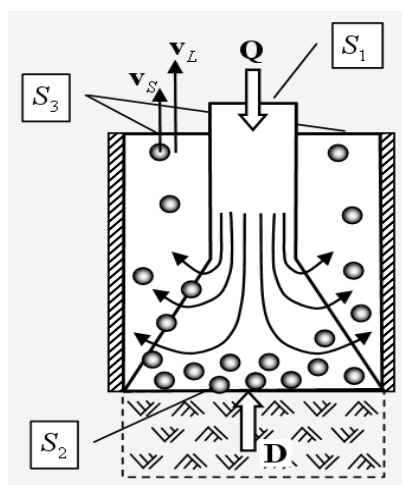


Рисунок 4 Транспортировка частиц в призабойном пространстве.

Через сечение S_1 внутрь объема поступает промывочная жидкость с секундным расходом Q (m^3/c). Через сечение S_2 внутрь поступает раздробленная порода (шлам) с объемной скоростью D (m^3/c). Через сечение S_3 объем покидает смесь шлама и промывочной жидкости. Принимаем, что боковая поверхность является непроницаемой для обоих компонентов. Будем считать скорость бурения D , а также распределение размеров частиц шлама и их скорости седиментации, заданными параметрами, а расход буровой жидкости Q – искомой величиной. В нижней части объема частицы шлама перемешиваются с буровым раствором, поступают в затрубное пространство и увлекаются течением буровой жидкости. В верхнем сечении S_3 все частицы и жидкость приобретают установившуюся скорость и концентрацию. Обозначим вертикальную составляющую скорости жидкости в окрестности выбранной частицы как v_L , скорость частицы – v_s .

Необходимым условием транспортировки шлама вверх по скважине со скоростью v_s для скорости буровой жидкости является условие $v_s = v_L - v_0$. При этом, скорость седиментации v_0 зависит от размера частицы, согласно закону (11). Те частицы, для которых $v_L > v_0$, увлекаются током буровой жидкости, более крупные частицы опускаются на забой для повторного перемалывания. Чем выше концентрация частиц в призабойном пространстве, тем большая часть шлама остается на забое, затрудняя процесс бурения. Отсюда – вывод: концентрация частиц в верхней части призабойного пространстве не должно превышать определенной величины. Обозначим эту величину, как c . Из сказанного следует, что c является параметром задачи.

Будем пренебрегать проникновением жидкости в частицу породы, тогда в элементарном объеме раствора dV содержится dV_s породы и dV_L жидкости, причем $dV = dV_s + dV_L$. Разделив обе части на dV , получаем:

$$c_s + c_L = 1, \tag{12}$$

где $c_s = \frac{dV_s}{dV}$, $c_L = \frac{dV_L}{dV}$ - концентрации твердой и жидкой фазы соответственно. Закон сохранения для каждой из фаз в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c_p}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_p), \quad p = S, L, \tag{13}$$

где \mathbf{j}_p - вектор плотности потока для p – й фазы, определяет количество объема данной фазы, переносимый в окрестности данной точки в единичный момент времени через единичный нормальный элемент сечения $|\mathbf{j}_p| = \frac{d^2V_p}{dS_{\perp} dt}$. Проинтегрировав равенство (13) по объему призабойного

пространства, получаем с помощью теоремы Остроградского – Гаусса:

$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c_p dV = \int_{S_1} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS} + \int_{S_2} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS} + \int_{S_3} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS}$. Здесь положительным считается направление внешней нормали к поверхности. Будем рассматривать стационарный режим бурения, при котором концентрация каждой фазы в любой точке объема – неизменна. Тогда, левая часть последнего выражения равна нулю, откуда получаем:

$$\int_{S_1} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS} + \int_{S_2} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS} + \int_{S_3} \mathbf{j}_p \cdot \mathbf{dS} = 0, \quad p = S, L. \tag{14}$$

Учитывая, что в соответствие со сказанным выше:

$\int_{S_1} \mathbf{j}_S \cdot \mathbf{dS} = \int_{S_2} \mathbf{j}_L \cdot \mathbf{dS} = 0$; $\int_{S_1} \mathbf{j}_L \cdot \mathbf{dS} = -Q$; $\int_{S_2} \mathbf{j}_S \cdot \mathbf{dS} = -D$, получаем на основании равенства (14):

$$\int_{S_3} j_S dS = D ; \tag{15}$$

$$\int_{S_3} j_L dS = Q . \tag{16}$$

Выразим плотности потоков фаз. Для жидкости $j_L = c_L v_L = (1 - c_S) v_L$, откуда, используя обозначение $c_S|_{S_3} = c$, находим:

$$(1 - c) \int_{S_3} v_L dS = Q \quad (17)$$

Твердая фаза состоит из множества частиц различных размеров d_i , объемов V_{Si} , двигающимися в окрестности данной точки с разными скоростями v_i и имеющими разные скорости седиментации v_{0i} . Разобьем эту фазу на множество фракций, внутри каждой из которых будем считать эти величины постоянными. Тогда:

$$j_S = \sum c_i v_i = \sum V_{Si} n_i v_i = n \sum p_i V_{Si} v_i = n \langle V_S v_S \rangle.$$

Здесь: n_i - концентрация частиц в i -й фракции, n - общая концентрация частиц, p_i - вероятность нахождения частицы в i -й фракции, угловыми скобками обозначено усреднение по ансамблю частиц. Учитывая, что $v_i = v_L - v_{0i}$, $n \langle V_S \rangle = c$, получаем:

$$j_S = n (\langle V_S \rangle v_L - \langle V_S v_0 \rangle) = c v_L - n \langle V_S v_0 \rangle.$$

Подставляя это выражение в (17), находим:

$$c \int_{S_3} v_L dS - n \langle V_S v_0 \rangle S_3 = D. \quad (18)$$

При выводе последнего равенства предполагалось, что, вследствие перемешивания, статистическое распределение частиц в сечении S_3 - постоянно.

Исключая $\int_{S_3} v_L dS$ из системы уравнений (17); (18), получаем исковую формулу:

$$Q = (1 - c) \left(\frac{D}{c} + \frac{\langle V_S v_0 \rangle}{\langle V_S \rangle} S_3 \right). \quad (19)$$

Требуемые усреднения в формуле (19) можно осуществить либо экспериментально, методом статистических испытаний, либо вычислить на

основании закона для распределения частиц по размерам (если таковой известен) и формулы (11). В качестве первого приближения можно воспользоваться моделью *монодисперсной* среды, состоящей из шарообразных частиц постоянного размера. В этом случае, последняя формула упрощается:

$$Q = (1 - c) \left(\frac{D}{c} + v_0 S_3 \right), \quad (22)$$

где v_0 определяется по формуле (11).

Таким образом, требуемый расход буровой жидкости зависит от скорости седиментации частиц шлама, скорости бурения и допустимой концентрации шлама в призабойной области. Ясно, что скорость бурения D , в свою очередь, зависит от количества шлама, оставшегося на забое (а значит и от Q) и от других режимных параметров бурения, поэтому вопрос о выборе оптимального режима должен решаться в комплексе, с учетом всех технологических параметров.

Выводы:

1. Получена кривая седиментации, позволяющая определять вертикальную скорость транспортировки шлама при очистке забоя ньютоновскими жидкостями – воздухом и водой.

2. Выведена формула для расчёта расхода бурового раствора, необходимого для качественной очистки забоя скважины при промывке водой или воздухом.

Литература

1. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроаэромеханика в бурении: Учебник для вузов.– М.: Недра, 1987. 304 с.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. 440 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. 712 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003 г. 840.
5. Межлумов А.О., Макурин Н.С. Бурение скважин с применением воздуха, газа и аэрированной жидкости. -М.: Недра, 1967. 320 с.