Записки Санкт-Петербургского горного института.
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.243.94

Н.И.ВАСИЛЬЕВ, Б.Б.КУДРЯШОВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ БУРОВОГО СНАРЯДА НА КАБЕЛЕ В СКВАЖИНЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СПУСКО-ПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Глубокое бурение ледовых отложений в Арктике и Антарктике осуществляется, в основном, электромеханическими и электротермическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле [I, 4]. Для предотвращения сужения ствола скважины под действием горного давления их заполняют заливочной жидкостью, создающей гидростатическое противодавление. В связи с необходимостью поднимать буровой снаряд на поверхность после каждого рейса для извлечения керна и шлама доля времени спуско-подъемных операций в общем балансе времени проходки скважины составляет от 50 до 90 %, поэтому задача повышения скорости СПО является весьма важной и актуальной. Для решения этой задачи необходимо знать закон движения бурового снаряда в скважине под действием приложенных к нему сил, в частности силы гидравлических сопротивлений.

Движение бурового снаряда на грузонесущем кабеле в залитой скважине аналогично движению съемного керноприемника в колонне бурильных труб при бурении комплексом ССК или движению керна при его гидротранспорте. Одно из отличий в том, что буровой снаряд, в частности электромеханический буровой снаряд КЭМС-112 [I], центрируется по оси скважины распорным устройством, а куски керна и съемный керноприемник свободны в радиальном направлении и движутся, прижимаясь к стенке скважины или трубы.

Силу гидравлических сопротивлений, препятствующих перемещению бурового снаряда, можно определить как сумму силы, вызванной разностью давлений под снарядом и над ним, силы трения снаряда о жидкость и силы, вызванной потерями давления по торцам снаряда при переходных процессах в течении жидкости, которые можно учесть поправочным коэффициентом K.

Очевидно, что

$$P_p = \Delta p \pi r^2; \qquad (1)$$

$$P_T = 2\pi r l \tau_1, \qquad (2)$$

где P_p – сила, вызванная разностью давлений под снарядом и над ним; Н; P_T – сила трения снаряда о жидкость, Н; Δp – разность давлений по торцам снаряда, Н; r – радиус бурового снаряда, м; τ_1 – касательные напряжения в тонком слое жидкости на поверхности бурового снаряда, Па;

$$P_p + P_т = \Delta p \pi r^2 + 2\pi r l \tau_1 . \qquad (3)$$

При описании процесса перемещения колонны бурильных труб в залитой скважине в работе [2] приводится выражение для определения касательных напряжений, исходя из предположения о наличии в зазоре между поверхностью бурильных труб и скважины нейтрального цилиндрического слоя, где касательные напряжения равны нулю,

$$\tau_1 = \frac{a(2r+a)}{2rl}\Delta p , \qquad (4)$$

где a – расстояние от поверхности снаряда до нейтральной поверхности, м.

Использование формулы (4) затруднено из-за сложности аналитических выражений для нахождения величины a, представленных трансцендентными уравнениями. В работе [2] приводятся в табличной форме значения относительного расстояния до нейтрального слоя $\bar{a} = a/r$ при различных значениях относительного радиального зазора $\bar{\delta} = \delta/r$. После обработки этих табличных данных с использованием метода наименьших квадратов получим

$$\bar{a} = 0{,}74\bar{\delta}^{1{,}14} . \qquad (5)$$

Таким образом, касательные напряжения в жидкости на поверхности бурового снаряда можно определить в явном виде через геометрические характеристики бурового снаряда, радиальный зазор и разность давлений.

Разность давлений определим по формуле Дарси

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v_ж^2 l}{r_1 - r} , \qquad (6)$$

где λ – коэффициент гидравлических сопротивлений; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; r_1 – радиус скважины, м; $v_ж$ – скорость потока жидкости в кольцевом пространстве, м/с,

При течении жидкости в стесненных условиях кольцевого пространства турбулентный режим наступает при значениях числа Рейнольдса начиная с 1600 [3], следовательно, практически во всем диапазоне изменения скорости СПО (табл.1) режим течения заливочной жидкости в зазоре между поверхностью скважины и бурового снаряда будет турбулентным.

Считая, в рабочем диапазоне значений числа Рейнольдса и радиального зазора поверхность бурового снаряда гидравлически гладкой [3], коэффициент гидравлических сопротивлений определим по формуле Блазиуса

$$\lambda = 0{,}2661 \frac{\nu^{0{,}25}}{(r_1 - r)^{0{,}25} v_ж^{0{,}25}} , \qquad (7)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с.

Таблица

Данные, характеризующие спуско-подъемные операции при бурении скважин во ль..

Показате	Диаметр снаряда, м	
	0,108	0,146
Длина бурового снаряда, м	6–13	
Радиальный зазор,	0,003–0,014	0,004–0,018
Коэффициент кинематической вязкости заливочной жидкости, $м^2/с$	$3 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$	
Скорость СПО, м/	0,1–1,0	
Коэффициент Рейнольдс	1000–17600	1300–24000
Относительный радиальный зазор	0,055–0,25	
ношение длины бурового снаряда к радиал ному зазору	340–4000	

Подставив выражение (7) в формулу (6) и выразив с помощью уравнения неразрывности [2] $v_ж$ через скорость перемещения бурового снаряда v, получим

$$\Delta p = 5{,}66 \cdot 10^{-3} \nu^{0,25} \rho l d^{1,75} \delta^{-3} \left(1 + \frac{\delta}{d}\right)^{-1,75} v^{1,75} \qquad (8)$$

где $\delta = r_1 - r$; d – диаметр бурового снаряда,

Подставив в формулу (3) выражение (4), получим

$$P_р + P_т = \pi (r + a)^2 \Delta p, \qquad (9)$$

тогда с учетом выражения (5) и коэффициента K

$$P_т = K \pi r^2 \left(1 + 0{,}74 \bar{\delta}^{1,14}\right)^2 \Delta p \qquad (10)$$

или с учетом выражения (8)

$$P_т = K \rho v^{1,75}, \qquad (11)$$

где

$$\rho = 4{,}62 \cdot 10^{-3} \left[1 + 1{,}63 \left(\frac{\delta}{d}\right)^{1,14}\right]^2 \nu^{0,25} \rho l d^{3,75} \delta^{-3} \left(1 + \frac{\delta}{d}\right)^{-1,75} \qquad (12)$$

Для определения коэффициента K была проведена серия опытов по исследованию процесса перемещения модели бурового снаряда на лабораторном стенде (рис.I) при обеспечении подобия течения жидкости в радиальном зазоре (табл.I, 2).

При проведении опыта бурового 2 опущена на дно скважины I, груз 7 зак в верхнем положении. После освобождения груза 7 он, опускаясь, поднимает соединенную с ним посредством гибкой связи 4 модель бурового снаряда 2. В качестве использована нержавеющая

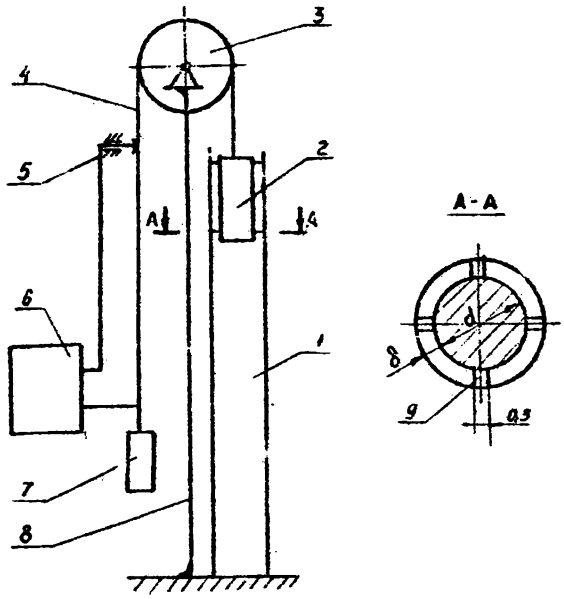


Рис.1. Схема стенда для исследования процесса перемещения модели бурового снаряда в заливочной жидкости

1 – модель скважины; 2 – модель бурового снаряда; 3 – ролик; 4 – гибкая связь; 5 – неподвижный контакт; 6 блок регистрации; 7 – груз; 8 – стойка; 9 – центратор

проволока диаметром 0,3 мм. В процессе опыта производится запись диаграммы перемещения модели бурового снаряда на быстродействующий самопишущий вольтметр типа Н-3021 посредством измерения сопротивления гибкой связи на участке между неподвижным контактом 5 и грузом 7.

Как показали результаты экспериментов, силы гидравлических сопротивлений практически мгновенно уравновешивают движущие силы и модель бурового снаряда движется с постоянной скоростью. Следовательно,

$$P_г = F, \qquad (13)$$

где F – движущая сила, приложенная к модели бурового снаряда, Н.

Значение коэффициента K можно определить из выражения

$$K = \frac{F}{\rho v_{оп}^{1,75}}, \qquad (14)$$

где $v_{оп}$ – скорость движения модели бурового снаряда, м/с.

При обработке результатов экспериментов выяснилось, что коэффициент K можно выразить в функции от относительного радиального зазора $\bar{\delta}$. Данные экспериментальных исследований и результаты расчета по формуле (14) представлены в табл.3. На рис.2 показан график зависимости $K = K(\bar{\delta})$ и опытные точки, каждая из которых является средним значением (из пяти опытов) скорости перемещения модели бурового снаряда.

Выражение

$$K = 1,04 + 13,04\bar{\delta} \qquad (15)$$

получено с использованием метода наименьших квадратов при обработке экспериментальных данных.

Как показали результаты замеров скорости спуска бурового снаряда в скважине, пробуренной в леднике Вавилова на Северной Земле в 1988 г. [1] расхождение расчетных и опытных данных значений скорости спуска бурового снаряда на участках с различными диаметрами не превышает 11 % (рис.2).

Таблица

Технические характеристики стенда для исследования на моделях процесса перемещения бурового снаряда в скважине

Показатели	Диаметр бурового снаряда, м				
	0,0235	0,0228	0,0225	0,0222	0,020
Модель скважины:					
длина, м			1,5		
длина измерительного участка, м			1,0		
внутренний диаметр, м			0,0248		
Зализочная жидкость (дистиллированная вода):					
коэффициент кинематической вязкости, 10^{-6} м^2/с			1,0		
плотность, кг/м^3			1000		
Масса груза, кг			0,677		
Модель бурового снаряда:					
длина, м			0,2		
сса, кг	0,239	0,227	0,209	0,211	0,181
Радиальный зазор, 10^{-3} м	0,65	1,00	1,15	1,30	2,15
Относительный радиальный зазор	0,0553	0,0877	0,1020	0,1170	0,2100
Отношение длины модели бурового снаряда к радиальному зазору	308	200	174	154	93

Таблица

Данные экспериментальных исследований процесса движения модели бурового снаряда на лабораторном стенде (ρ 1000 кг/м^3, ν 10^{-6} м^2/с)

$\bar{\upsilon}$	Re	δ, 10^{-3} м	d, м	β, Н(с/м)$^{1.75}$	F', Н	$\upsilon_{оп}$, м/с	K
0,0553	1080	0,65	0,0235	83,20	5,194	0,147	1,79
0,0877	3120	1,00	0,0228	20,57	5,[illegible]	0,286	2,29
0,1020	4090	1,15	0,0225	12,32	5,410	0,382	2,26
0,1170	4720	1,30	0,02	8,55		0,450	2,54
0,2100	9280	2,15	0,0205	1,45	5,507	1,000	3,80

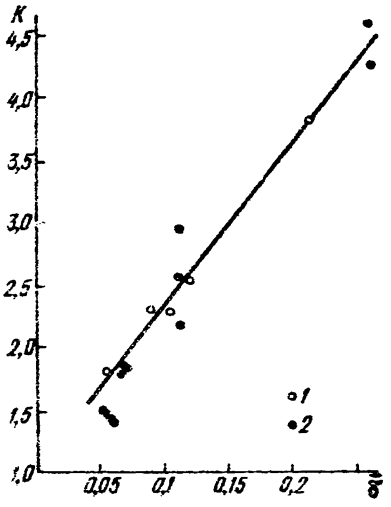


Рис.2. Опытный график зависимости коэффициента K от относительного зазора
1 – данные стендовых исследований на модели; 2 – данные замеров в скважине

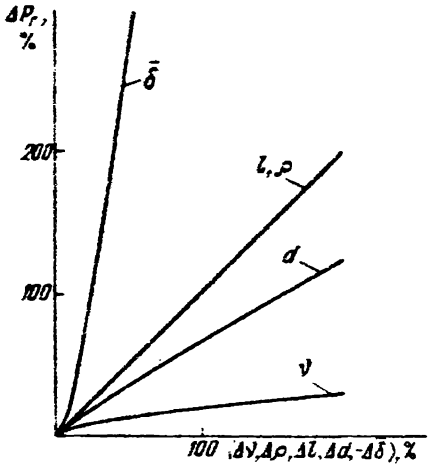


Рис.3. График зависимости изменения силы гидравлических сопротивлений от изменения различных факторов

Обозначим

$$\rho_1 = K\rho, \tag{16}$$

тогда выражение (11) примет вид

$$P_T = \rho_1 v^{1,75}, \tag{17}$$

где ρ_1 – коэффициент, характеризующий влияние геометрических характеристик бурового снаряда и скважины, а также свойств заливочной жидкости на величину сил гидравлических сопротивлений.

Подставив в равенство (16) выражения (12) и (15), получим

$$\rho_1 = 4,62\cdot 10^{-3}\left(1,04+26,08\frac{\bar{\delta}}{d}\right)\left[1+1,63\left(\frac{\bar{\delta}}{d}\right)^{1,14}\right]^2 \nu^{0,25}\rho l d^{3,75}\bar{\delta}^{-3}\left(1+\frac{\bar{\delta}}{d}\right)^{-1,75} \tag{18}$$

или

$$\rho_1 = 3,7\cdot 10^{-2}(1,04+13,04\bar{\delta})(1+0,74\bar{\delta}^{1,14})^2 \nu^{0,25}\rho l d^{0,75}\bar{\delta}^{-3}(1+\bar{\delta})^{-1,75} \tag{19}$$

Анализ полученных зависимостей (рис.3) показывает, что наиболее значимым фактором, влияющим на величину гидравлических сопротивлений при перемещении бурового снаряда в скважине, заполненной заливочной жидкостью, является относительный радиальный зазор или, при постоянном диаметре бурового снаряда, радиальный зазор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобин Н.Е., Васильев Н.И., Кудряшов Б.Б. и др. Механическое бурение скважин во льду / Ленинградский горный ин-т. Л. 1988.

2. Гукасов Н.А. Справочное пособие по гидравлике и гидродинамике в бурении. М.: Недра, 1982.

3. Маковей Н. Гидравлика в буречии. М.: Недра, 1986.

Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. М.: Нед 1983.