Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1985, т.105

УДК 622.243.572.002.54

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ СЪЕМНОГО ИНСТРУМЕНТА В БУРИЛЬНЫХ ТРУБАХ

В.П.ОНИЩИН, Н.И.КОРНИЛОВ,
В.В.ЯКОВЕНКО

При бурении вертикальных и пологонаклонных скважин объемный инструмент занимает рабочее положение под действием его собственной тяжести.

Определение зависимости коэффициента сопротивления C_R, силы сопротивления жидкости F_c и скорости движения съемного инструмента v от его веса, длины, угла наклона скважины, вязкости промывочной жидкости и величины кольцевого зазора проводилось на специально изготовленном экспериментальном стенде методом падающего груза.

Экспериментальный стенд (рис.I) состоит из стеклянной трубы 3 длиной L = 3,0 м и внутренним диаметром d_2 = 36 мм, уложенной в металлический уголок 4. Шарнирная пята I в его нижней части позволяет располагать трубу под разными углами α к горизонту, имитируя положение бурильной трубы в наклонной скважине.

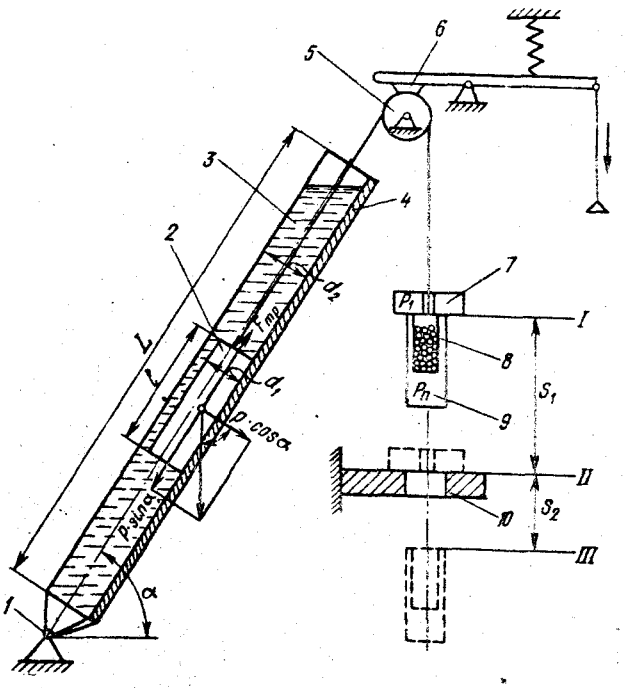


Рис.1. Экспериментальный стенд
1 – шарнирная пята; 2 – стальной цилиндр; 3 – стеклянная труба; 4 – металлический уголок; 5 – блок; 6 – тормоз; 7 – груз; 8 – дробь; 9 – противовес; 10 – плита

В стеклянную трубу с жидкостью помещалась цилиндрическая модель съемного инструмента 2. В опыте менялись его длина ℓ, наружный диаметр d_1 и вес P. С помощью нейлоновой нити, перекинутой через легкий блок 5, закрепленный в нижней части стенда, цилиндр уравновешивался противовесом 9 весом $P_П$. Равенство веса цилиндра P в жидкости и противовеса $P_П$ обеспечивалось засыпкой в противовес

дроби 8. На противовес устанавливался груз 7 весом P_1, приводящий систему уравновешенных весов P и $P_П$ в движение при освобождении тормоза 6.

Начиная движение из положения I, противовес проходил через отверстие плиты 10, закрепленной на раме стенда, и, совершив путь S_1, оставлял груз на плите в положении II. Пройдя путь S_2, который, как будет показано ниже, обратно пропорционален коэффициенту сопротивления жидкости, противовес останавливался в положении III.

Так как противовес весом $P_П$ уравновешивается весом цилиндра P в жидкости и силой трения о стенку трубы $F_{ТР}$, то

$$P_П = \left(P - \frac{P}{\gamma_И}\gamma_Ж\right)\sin\alpha + \left(P - \frac{P}{\gamma_И}\gamma_Ж\right)\cos\alpha\, f =$$
$$= P\left(1 - \frac{\gamma_Ж}{\gamma_И}\right)\left(\sin\alpha + f\cos\alpha\right) = P\beta,$$

где $\gamma_И$ и $\gamma_Ж$ - удельный вес материала цилиндра и жидкости; F_a - архимедова сила, $F_a = P\gamma_Ж/\gamma_И$; f - коэффициент мокрого трения цилиндра.

Тогда теорема о изменении кинетической энергии системы [2] для участков движения грузов I-II и II-III примет вид соответственно

$$\frac{P}{g}\frac{v^2}{2} + \frac{P\beta}{g}\frac{v^2}{2} + \frac{P_1}{g}\frac{v^2}{2} = P_1 S_1 - F_C S_1; \qquad (I)$$
$$0 - \left[\frac{P}{g}\frac{v^2}{2} + \frac{P\beta}{g}\frac{v^2}{2}\right] = -F_C S_2.$$

В уравнения (I) не включены кинетическая энергия T_δ и работа момента сил трения m_δ блока 5, которые, по нашим расчетам, пренебрежимо малы (так, например, $m_\delta = 23{,}5\cdot10^{-6}$ Дж).

Представив формулы (I) в виде

$$\frac{1}{2g}\left[P + P\beta + P_1\right]V^2 + S_1 F_C = P_1 S_1;$$
$$\frac{P}{2g}\left[1+\beta\right]V^2 - S_2 F_C = 0$$

и положив $a_1 = \left[P + P\beta + P_1\right]/2g$; $a_2 = P(1+\beta)/2g$, получим

$$F_C = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & P_1 S_1 \\ a_2 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & S_1 \\ a_2 & -S_2 \end{vmatrix}} = \frac{-a_2 P_1 S_1}{-a_1 S_2 - a_2 S_1} = \frac{\frac{P}{2g}(1+\beta)P_1 S_1}{\frac{1}{2g}\left(P + P\beta + P_1\right)S_2 + \frac{1}{2g}(P+P\beta)S_1} =$$
$$= \frac{P P_1 (1+\beta) S_1}{P(1+\beta)(S_1+S_2) + P_1 S_2}; \qquad (2)$$

$$V^2 = \frac{\begin{vmatrix} P_1 S_1 & S_1 \\ 0 & -S_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & S_1 \\ a_2 & -S_2 \end{vmatrix}} = \frac{2g P_1 S_1 S_2}{P(1+\beta)(S_1+S_2) + P_1 S_2}. \qquad (3)$$

Тогда коэффициент сопротивления C_R при движении съемного инструмента

$$C_R = \frac{F_c}{\rho \frac{V^2}{2} \sigma} = \frac{P\left[1+\left(1-\frac{\gamma_ж}{\gamma_и}\right)(\sin\alpha + f\cos\alpha)\right]}{\gamma_ж \sigma S_2} .$$

или, если положить $P = \sigma \ell \gamma_и$ (здесь σ – площадь сечения съемного инструмента)

$$C_R \left[\frac{\gamma_и}{\gamma_ж} + \left(\frac{\gamma_и}{\gamma_ж} - 1\right)(\sin\alpha + f\cos\alpha)\right] \ell / S_2 . \qquad (4)$$

При вертикальной скважине ($\alpha = 90^0$) формулы (2), (3) и (4) упрощаются ($\beta = 1 - \gamma_ж / \gamma_и$):

$$F_c = \frac{P P_1 \left(2 - \frac{\gamma_ж}{\gamma_и}\right) S_1}{P\left(2 - \frac{\gamma_ж}{\gamma_и}\right)(S_1 + S_2) + P_1 S_2} ;$$

$$v^2 = \frac{2g P_1 S_1 S_2}{P\left(2 - \frac{\gamma_ж}{\gamma_и}\right)(S_1 + S_2) + P_1 S_1} ;$$

$$C_R = \ell\left(2 - \frac{\gamma_и}{\gamma_ж} - 1\right) / S_2 .$$

Для определения коэффициента f рассмотрим движение цилиндра в трубе (внутренняя часть которой смочена промывочной жидкостью), наклоненной к горизонту под углом α.

Движение цилиндра в трубе возможно только при условии $P\sin\alpha \geq F_{тр} = P f \cos\alpha$. Следовательно, $tg\alpha \geq f$, т.е. угол наклона α, соответствующий началу движения цилиндра, определяет величину коэффициента мокрого трения f. Многочисленные эксперименты, проведенные для цилиндра с размерами $\ell = 0{,}3$ м и $d_1 = 0{,}033$ м, позволили определить среднюю величину $f = 0{,}298 \cong 0{,}3$, соответствующую углу $\alpha = 16{,}5^0$. Учитывая, что внутренняя поверхность бурильных труб ССК имеет высокую чистоту поверхности [1], аналогичную чистоте поверхности стеклянной трубы, это значение f можно считать близким к действительности.

Путь противовеса S_1, в целях получения более стабильных по значению результатов, задавался с незначительными отклонениями по величине (1,2–1,4 м). Каждый из экспериментов повторялся 10–15 раз, для расчетов по формулам (3) и (4) брались средние или наиболее часто встречающиеся значения (см. таблицу, рис. 2, 3).

Как известно из гидроаэродинамики, сопротивление неудобообтекаемого тела, находящегося в свободном потоке, можно значительно снизить, если снабдить его обтекателями [3]. С этой целью была предпринята попытка уменьшить коэффициент сопротивления цилиндра с помощью обтекателей, которые последовательно крепились на нижнем и верхнем концах цилиндра, а также

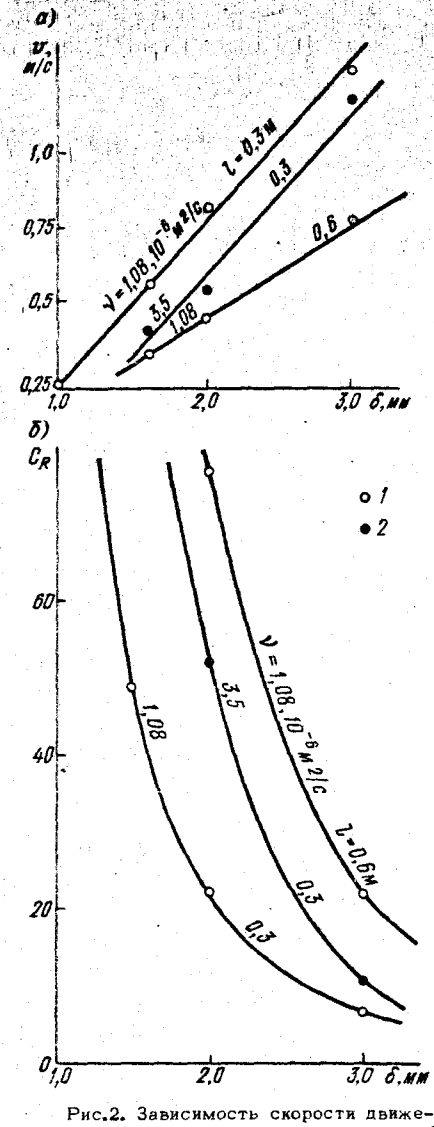


Рис.2. Зависимость скорости движения v (а) и коэффициента сопротивления C_R (б) цилиндра от величины кольцевого зазора δ в вертикальной трубе
1 - вода; 2 - эмульсия; ν - кинематическая вязкость

на обоих концах одновременно. Обтекатели были выполнены из металла и имели форму удлиненной полусферы. Определение коэффициента сопротивления проводились по формуле (4) для цилиндра с наружным диаметром d_1 = 0,033 м, длиной ℓ = 0,6 м в стеклянной трубе, заполненной водой. Результаты испытаний следующие:

Обтекатель	δ_2 (см. рис.1), м	C_R
Нет	0,058	155
Верхний	0,0554	162
Нижний	0,0565	159
Оба	159	165

Таким образом, наличие обтекателей не уменьшает, а несколько увеличивает коэффициент сопротивления C_R, что, очевидно, вызвано наличием дополнительных сил трения боковых поверхностей обтекателей.

Можно также предположить, что подобные устройства, устраняя срывные явления, улучшают обтекание в свободном потоке, а не в стесненных условиях, где срыв потока незначителен.

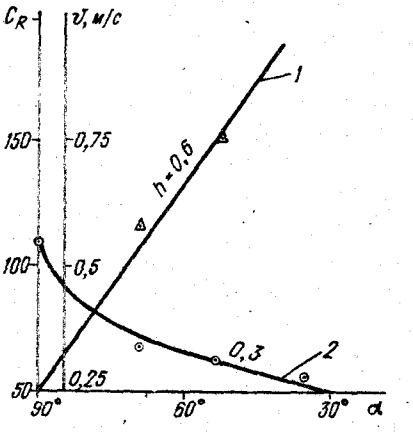


Рис.3. Зависимость скорости движения v цилиндра и коэффициента сопротивления C_R от угла наклона трубы α (опыты с водой)
1 - C_R; 2 - v

Условия и результаты экспериментальных работ

Серия	Условия						Результаты		
	постоянные	переменные							
		d_2, м	P, Н	δ, мм	δ_1, м	α	δ_2, м	c_R	v, м/с
1	ℓ = 0,3 м,	0,03	16,2/16,6	3,0	–	–	0,66/0,43	6,8/10,5	1,28/1,18
	P_1 = 6,3 Н,	0,032	18,6/18,6	2,0			0,23/0,084	19,5/52	0,82/0,53
	α = 90°,	0,033	19,6/19,6	1,5			0,097/0,045	46,4/980	0,54/0,387
	δ_1 = 1,215 м	0,034	21,0/20,6	1,0			0,017/0	264/–	0,231/0
2	ℓ = 0,6 м,	0,03	29,4	3,0	1,28	–	0,36	22,2	0,789
	P_1 = 6,3 Н,	0,032	33,3	2,0	1,4		0,102	78,1	0,435
	α = 90°, вода	0,033	35,3	1,5	1,4		0,063	285	0,335
		0,034	37,2	1,0	1,4	–	0	–	0
3	ℓ = 0,3 м,	–	–	–	1,215	90°	0,093	48,4	0,54
	d_2 = 0,093 м,				0,83	70	0,036	128,7	0,34
	P = 19,6 Н,				0,77	54	0,032	150	0,32
	δ = 1,5 мм,				1,215	35,6	0,022	216	0,284
	P_1 = 6,3 Н								

Примечание. В числителе – опыты с водой, в знаменателе – с эмульсией.

Выводы

1. На скорость движения съемного инструмента в вертикальной скважине наиболее существенно влияет величина зазора между ним и внутренней поверхностью бурильной трубы. При увеличении зазора в 2 раза скорость движения съемного инструмента увеличивается в 3–3,5 раза.

2. Свободное движение съемного инструмента под действием собственного веса в наклонной скважине зависит от коэффициента трения. В скважине, заполненной водой, минимальный угол наклона, при котором возможно свободное движение съемного инструмента, 70–75°.

3. С увеличением кинематической вязкости промывочной жидкости уменьшается скорость движения съемного инструмента. Повышение вязкости в 3 раза снижает скорость движения на 25 %.

4. Увеличение длины съемного инструмента в 2 раза уменьшает скорость его движения на 40 %.

5. В условиях стесненности потока улучшения гидродинамической формы съемного инструмента путем применения обтекателей не снижает сопротивления при его движении. Увеличения скорости движения съемного инструмента в рассматриваемых условиях, очевидно, можно добиться, применяя встроенные в конструкцию съемного инструмента винтовые или реактивные двигатели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаев М.И., Онищин В.П. Бурение скважин со съемными керноприемниками. Л., Недра, 1975.

2. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. М., Наука, 1983.

3. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. М., Гостехтеоретиздат, 1951.