

Проверочные расчеты затрат мощности на бурение и прочности
бурильных колонн для восстающих скважин

Юшков А. С., Рязанов А. Н., Каракозов А. А.
Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Аннотация

Рассмотрены особенности работы бурильной колонны в восстающей скважине. Предложены откорректированные зависимости затрат мощности на бурение и методика расчетов прочности бурильных колонн.

Известно, что затраты мощности на бурение скважин складываются из трех составляющих:

$$N = N_{ст} + N_{рз} + N_{тр}, \quad (1)$$

где $N_{ст}$ – затраты мощности на потери в станке, $N_{рз}$ – на разрушение забоя и $N_{тр}$ – на вращение колонны бурильных труб под нагрузкой.

Исследования затрат мощности выявили их зависимость от множества факторов и привели к появлению большого числа эмпирических формул [1], расчет по которым оказывается сопоставим с фактическими затратами лишь в весьма узких пределах. Особенно это касается $N_{тр}$. В практике проектирования используется формула (2), которая отличается тем, что учитывает практически все факторы, влияющие на результат расчетов [2]:

$$N_{тр} = K_{см} K_{скв} K_{м} \left[1,6 \cdot 10^{-8} K_c K_{\kappa} K_u (0,9 + 0,02\delta) D_c \frac{q_c}{(1000EJ)^{0,16}} n^{1,85} L^{0,75} (1 + 0,44 \cos \eta) + 2 \cdot 10^{-8} \delta n P \right] \quad (2)$$

где $K_{см}$ – коэффициент, учитывающий применение антивибрационной смазки или эмульсионных растворов; $K_{скв}$ – коэффициент, учитывающий особенности ствола скважины (кавернозность, разработку ствола); $K_{м}$ – коэффициент, учитывающий влияние материала труб на их трение о стенки скважины; K_c – коэффициент, учитывающий тип соединений бурильных труб; K_{κ} – коэффициент, учитывающий кривизну труб; K_u – коэффициент, учитывающий влияние интенсивности искривления скважин (по данным [1] $K_u = 1 + 60i$, где i – интенсивность искривления, градус/м); δ – зазор между бурильными трубами и стенками скважины на сторону, мм; D_c – диаметр скважины, мм; EJ – жесткость бурильных труб, Па·м⁴; q_c – масса 1 м бурильных труб с учетом соединений, кг; L – глубина скважины, м; n – частота вращения, об/мин; η – угол наклона скважины к горизонтали, градус; P – осевая нагрузка, Н.

В учебных проектах [3] кафедра ТТГР ДонНТУ использует эту формулу в адаптированном к основным единицам СИ виде (3)

$$N_{тр} = K_{см} K_{скв} K_{м} \left[0,016 K_c K_{\kappa} (1 + 60i) (0,9 + 20\delta) D_c \frac{q_c}{(1000EJ)^{0,16}} n^{1,85} L^{0,75} (1 + 0,44 \cos \eta) + 0,02 \delta n P \right] \quad (3)$$

Применение формулы (3) для восстающих скважин, буримых в угольных шахтах, при произвольно принятых коэффициентах и без учета особенностей работы бурильной колонны приводило к явно ошибочным выводам.

Для условий бурения восстающих скважин в угольных шахтах можно принять следующие величины коэффициентов: $K_{см} = 1$, т.к. смазка не применяется, а промывочная жидкость – техническая вода; $K_{м} = 1$, т.к. трубы стальные; $K_{скв}$ можно принять равным 1,3, учитывая, что скважины бурятся в породах средней крепости, а разработка скважины составляет в этих условиях 5% [2]; $K_c = 1$, т.к. применяются колонны с ниппельным соединением; $K_{\kappa} = 1$, т.к. используются трубы длиной 1–1,5 м, обладающие большей жесткостью; $i = 0$, т.к. скважины имеют небольшую длину.

Особенностью бурения вверх является то, что колонна труб изначально находится в сжатом состоянии за счет собственного веса. Осевая составляющая веса зависит от угла наклона и определяется как

$$Q_o = q_{\phi} L \sin \eta \quad (4)$$

где $q_{\phi} = 9,81 q_c$ – вес 1 м труб при массе одного метра q_c .

Подсчет веса не должен учитывать выталкивающей силы промывочной жидкости, т.к. для промывки скважины используется безнапорный поток с небольшим расходом. В связи с указанным первое слагаемое в формуле (3), представляющее собой затраты мощности на вращение труб без осевой нагрузки (в вертикальных скважинах для колонны, подвешенной на вращателе станка и не опирающейся на забой) и учитывающее изгиб труб только за счет центробежных сил, присутствует в формуле условно, т.к. реально подвесить колонну за забой для измерения затрат мощности весьма затруднено.

Осевая нагрузка на забой P во втором слагаемом должна быть заменена суммой $Q_o + P$, причем наибольшее значение эта величина имеет у вращателя станка.

После замены выражения $\frac{q_c}{(1000EJ)^{0,16}}$ коэффициентом K и учета применяемых выше коэффициентов, формула для расчета $N_{тр}$ приобретает вид (5)

$$N_{\delta\delta} = 0,0208 (0,9 + 20\delta) D_{\bar{n}} K n^{1,85} L^{0,75} (1 + 0,44 \cos \eta) + 0,026 \delta n (Q_o + P) \quad (5)$$

Здесь величина δ определяется как $\delta = (D_c - d) / 2$, где d наружный диаметр труб, D_c – диаметр скважины равный $D_c = 1,05D$ (D – диаметр долота; 1,05 – коэффициент разработки).

Проверочные расчеты по формуле (5) выполнялись для трех типов станков подземного бурения с разной мощностью привода (табл. 1).

Таблица 1 – Краткие технические характеристики буровых станков

Тип станка	БСК-2РП-В	СБГ-1М	GBH
Мощность привода, кВт	11	13	63
Частоты вращения, об/мин	200		
	340	199	150
	580	306	300
	1080		
Усилие подачи, кН	12	63	120
Бурильные трубы (наружный диаметр, мм)	СБТН-42 (42)	СБТН-50 (50)	ALS3807 (76,1) AWK0501 (88,9)

Для бурильных колонн были пересчитаны основные характеристики (табл.2) с учетом массы соединений и длины труб (для станков БСК-2РП-В и СБГ-1М – 1,5 м, для станка GBH – 1 м).

Таблица 2 – Характеристики бурильных колонн

Тип труб	d, м	d _в , м	Δ, м	q _с , кг	q _ф , Н	F, м ²	J, м ⁴	W, м ³	q_c
									$(1000EJ)^{0,16}$
СБТН-42	0,042	0,032	0,005	6,94	68,0	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$0,10 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	0,47
СБТН-50	0,050	0,039	0,0055	9,04	88,6	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,193 \cdot 10^{-6}$	$15,44 \cdot 10^{-6}$	0,55
ALS3807	0,0761	0,059	0,0085	20	196,0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$55,2 \cdot 10^{-6}$	0,93
AWK0501	0,0889	0,055	0,017	36	352,8	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$117,9 \cdot 10^{-6}$	1,45

Примечание: Δ – толщина стенки, F – площадь сечения тела трубы.

Составляющая Q₀+P в формуле (5) не должна превышать усилие подачи станка. Выявлено, что ограничения для расчетов существуют лишь для станка БСК-2РП-В. Из данных табл.3 видно, что предельная осевая нагрузка, равная усилию подачи возможна в горизонтальной скважине, а в скважинах, направленных вертикально вверх, составляет около 5 кН. Полученные величины приемлемы для колонкового бурения, но недостаточны для бескернового бурения долотами.

Таблица 3 – Зависимость Q₀ и предельного P от угла наклона скважин для станка БСК-2РП-В

η, град	Q ₀ , кН	P=F-Q ₀
0	0	12,0
15	1,76	10,24
30	3,40	8,60
45	4,81	7,19
60	5,89	6,11
75	6,57	5,43
90	6,8	5,2

Для других станков с большим усилием подачи допустимы осевые нагрузки вплоть до предельных (для долот диаметром 132 мм – 65 кН, 112 мм – 50 кН, 93 мм – 40 кН, 76 мм – 35 кН) при условии сохранения прочности бурильных колонн.

Для расчетов были приняты следующие условия: угол η=45°, глубина скважины L=100 м, диаметры бурения для станка БСК-2РП-В – 76 мм; СБГ-1М – 112 и 93 мм, GBH – 132 и 112 мм при различных значениях осевой нагрузки.

Очевидно, что суммарные затраты мощности не должны превышать номинальной мощности станка. Затраты мощности на разрушение забоя и потери в станке определены по известным формулам [2]:

$$N_{pz} = 0,102 \mu D P n \quad (6)$$

где D – диаметр шарошечного долота; μ=0,17 – коэффициент трения для долот диаметром 76 мм и более.

Затраты мощности на потери в станке для шпиндельных станков БСК-2В и СБГ-1М:

$$N_{cm} = N_o (4,35 \cdot 10^{-2} + 1,7 \cdot 10^{-4} n), \quad (7)$$

а для станка GBH с подвижным вращателем и гидроприводом:

$$N_{cm} = N_o (0,18 + 1,4 \cdot 10^{-4} n). \quad (8)$$

Результаты расчетов представлены в табл.4 и на рис.1-3.

Для станка БСК-2РП-В в принятых условиях бурение возможно без ограничения осевой нагрузки. Для станка СБГ-1М при диаметре 112 мм допустимо бурение при n=199 об/мин при осевой нагрузке до 17 кН, при n=306 об/мин – до 8 кН. Если диаметр бурения 93 мм, то допустимо бурение при n=199 об/мин без ограничения осевой нагрузки, при n=306 об/мин при осевой нагрузке до 12 кН. Для станка GBH бурение возможно для всех рассмотренных вариантов, независимо от применяемых бурильных труб, но при использовании частоты 300 об/мин суммарная мощность близка к пределу. Интересно, что изменение диаметра труб не приводит к существенной разнице в затратах мощности, т.к. рост затрат из-за увеличения веса труб и изменения жесткости компенсируется их снижением за счет уменьшения величины зазора (на резкое влияние величины зазора на затраты мощности указывалось в работах [1,4]).

Таблица 4 – Расчетные затраты мощности при бурении восстающей скважины.

Тип станка	P, кВт	n, об/мин	D, мм	d, мм	N _{ср} , кВт	N _{рз} , кВт	N _{тр} , кВт	N, кВт
БСК-2РП-В N ₀ =11 кВт	7	200	76	42	0,85	1,85	1,93	4,63
		340			1,11	3,14	4,04	8,26
СБГ-1М	15	199	112	50	1,01	5,8	5,97	12,78

N ₀ =13 кВт	20	199			1,01	7,73	6,98	15,72
	20	199	93	50	1,01	6,42	4,40	11,83
GBH N ₀ =63 кВт	30	306			1,24	9,87	7,55	18,66
		150	132	76,1	12,66	10,3	7,09	30,1
	300	132	88,9	12,66	10,3	7,93	20,0	51,7
		150	112	76,1	12,66	8,74	5,37	30,9
	300	112	88,9	12,66	8,74	17,48	13,6	54,6
		150	112	88,9	12,66	8,74	4,84	26,8
	300			13,99	17,48	12,63	45,1	
							26,2	
							44,1	

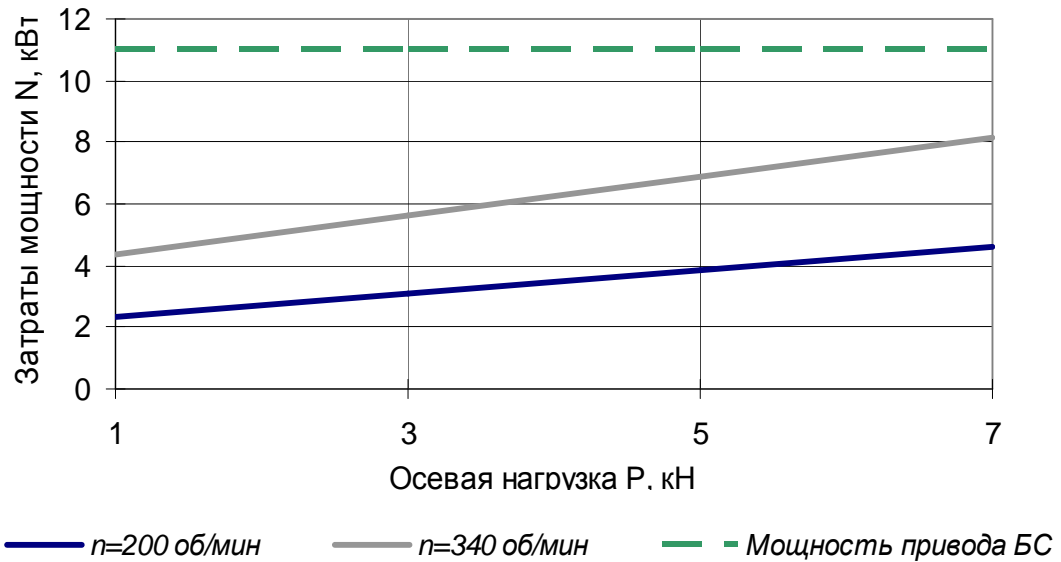


Рис.1. Расчетные зависимости затрат мощности на бурение станком БСК-2РП-В скважины диаметром 76 мм от осевой нагрузки

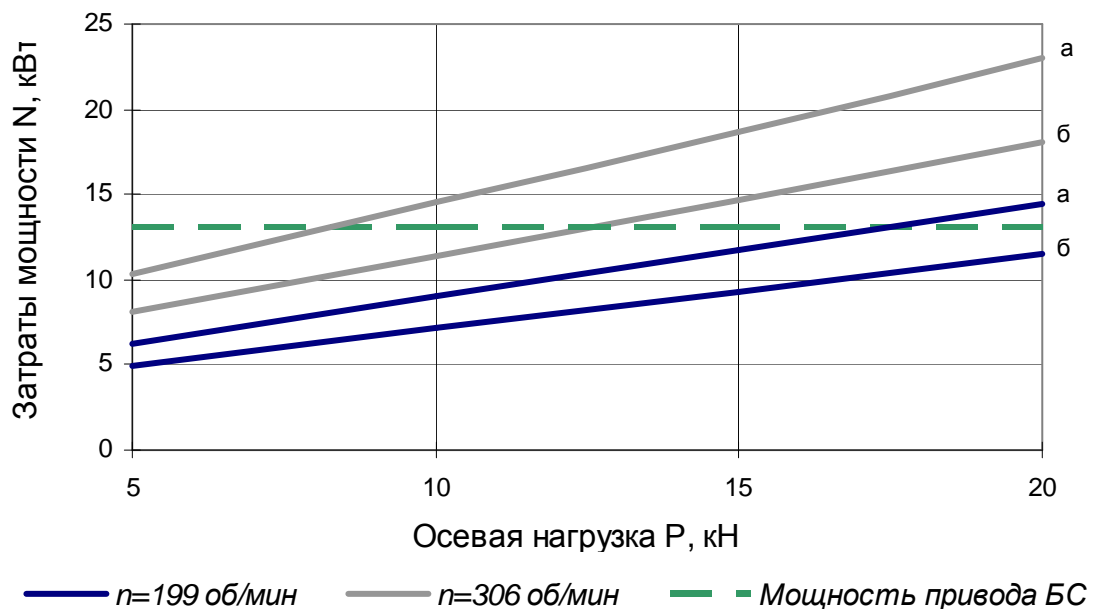


Рис.2. Расчетные зависимости затрат мощности на бурение станком СБГ-1М скважин диаметром 112 мм (а) и 93 мм (б) от осевой нагрузки

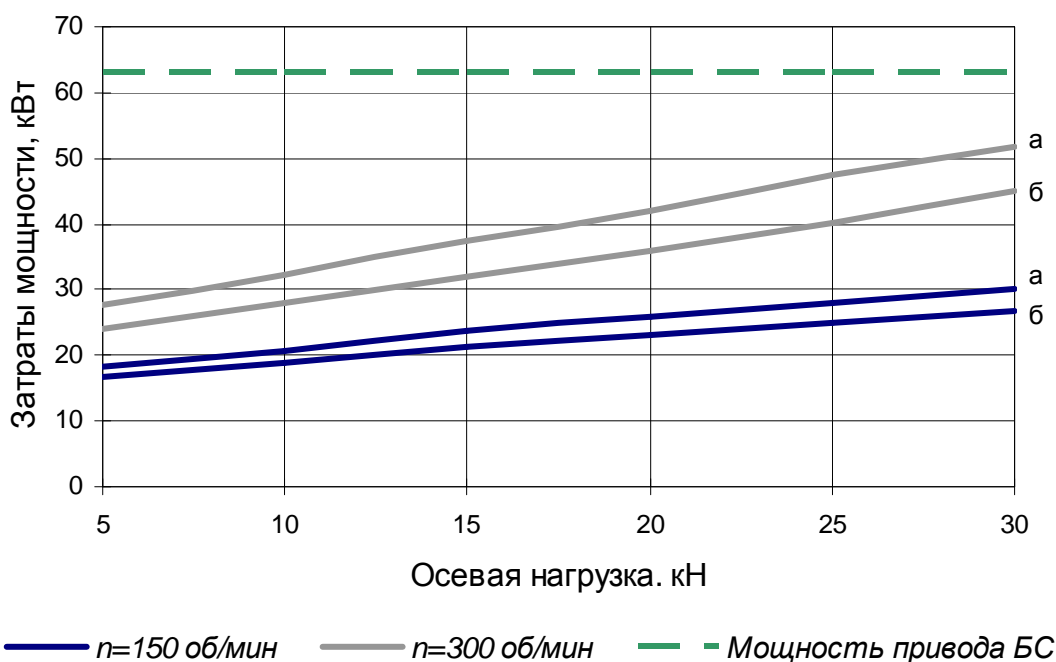


Рис.3. Расчетные зависимости затрат мощности на бурение станком GBH скважин диаметром 132 мм (а) и 112 мм (б) от осевой нагрузки

Для расчетов по проверке прочности бурильных колонн приемлема методика, рекомендованная в [3] для бурения с дополнительной нагрузкой (отсутствует растянутый участок колонны, нулевое сечение мнимое). Максимальные напряжения сжатия определяются нагрузкой Q_0+P в сечении у вращателя станка. В связи с тем, что это сечение является наиболее нагруженным и по крутящему моменту, то выполнение расчетов для сечения труб у забоя скважины теряет смысл.

В таблице 5 приведены условия и результаты расчетов для бурения восстающей скважины глубиной 100 м под углом 45° .

Таблица 5 – Результаты расчетов прочности труб

Тип станка и труб	D, мм	D _c , м	n, об/мин	P, кН	Q ₀ , кН	N _{рз} , кВт	N _{тр} , кВт	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{и}$, МПа	τ , МПа	σ_{Σ} , МПа	Запас прочности n
БСК-2РПВ СБТН-42	76	0,0798	340	7	4,81	3,14	4,01	20,4	18,7	20,9	57,2	8,74
СБГ-1М СБТН-50	112	0,1176	199	15	6,26	5,8	5,97	27,6	2,22	36,6	79,04	6,3
GBH Ø76,1	132	0,1386	300	30	13,85	20,6	17,06	24,4	25,06	21,7	63,3	7,9

В итоге, по результатам внесенных изменений в расчетные формулы и методику проверочных расчетов, можно сделать вывод о пригодности формулы (5) для использования при учебном проектировании бурения восстающих скважин. При этом обеспечивается главная задача – возможность выявления пределов основных параметров режима бурения частоты вращения и осевой нагрузки для заданных диаметра бурения и типа бурильных труб.

Выявление фактических зависимостей путем экспериментальных исследований могло бы стать основой серьезной научной работы, например, при подготовке магистров по специальности “Бурение”.

Библиографический список

1. Кардыш, В.Г. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин /В.Г. Кардыш, Б.В. Мурзаков, А.С. Окмянский. – М.: Недр, 1984. – 200 с.
2. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: В 2-х томах / Под ред. Е.А. Козловского. – Том 2. – М.: Недр, 1984. – 437 с.
3. Курсове та дипломне проектування бурових робіт: Навчальний посібник / [О.І. Калініченко, О.С. Юшков, Л.М. Івачов та інші.] – Донецьк: ДонДТУ, 1998. – 153 с.
4. Колосов, Д.П. Техника и технология бурения восстающих скважин /Д.П. Колосов, И.Ф. Глухов. – М.: Недр, 1988. – 150 с.