

## ВЫБОР МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СПУСКО-ПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ БУРЕНИИ ГЛУБОКИХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

О. С. Головин

При выборе мощности двигателя для привода станка определяющими факторами являются затраты мощности на процесс бурения и производство спуско-подъемных операций. Последние имеют большое значение при работе на больших глубинах, где крепость породы значительно возрастает и время пребывания бурового наконечника на забое уменьшается.

Ниже предлагается метод определения потребной мощности двигателя на производство спуско-подъемных операций.

Продолжительность спуско-подъемных операций

$$T_{\text{сп}} = T_{\text{мис}} + T_{\text{мп}} + T_{\text{н}} + T_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{мис}}$ ,  $T_{\text{мп}}$ ,  $T_{\text{н}}$  и  $T_{\text{д}}$  — продолжительность соответственно машинного времени на подъем и спуск инструмента, машинно-ручных операций, наращивания инструмента, замены бурового наконечника и извлечения керна.

Машинное время спуско-подъема инструмента

$$T_{\text{мис}} = \alpha \left( \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} + \dots + \frac{L_k}{v_k} + \frac{L_0}{v_k} \right), \quad (2)$$

где  $L_1, L_2, \dots, L_k$  — длины колонн бурильных труб, поднимаемых за все время бурения скважины соответственно на 1, 2, ...,  $k$  скоростях;

$v_1, v_2, \dots, v_k$  — максимальные скорости подъема инструмента;

$L_0$  — путь, проходимый незагруженным элеватором при спусках за все время бурения; можно принять, что  $L_0$  равно общей длине поднимаемых из скважины труб;

$\alpha = \frac{v_{\text{мах}}}{v_{\text{сп}}}$  — множитель скорости; в зависимости от скорости подъема он колеблется от 1,15 до 1,25.

Для определения величины  $L_0$  принимаем, что в интервалах скважины  $H_1, H_2, \dots, H_n$  средние длины рейсов будут соответственно  $m_1, m_2, \dots, m_n$ .

Тогда по мере бурения того или иного интервала длина поднимаемых труб будет увеличиваться в арифметической прогрессии. Так, для интервала  $H_1$  суммарная длина поднятых штанг

$$C_1 = m_1 + 2m_1 + 3m_1 + \dots + \frac{H_1}{m_1} m_1$$

или

$$C_1 = \frac{m_1 + H_1}{2m_1} H_1. \quad (3)$$

Для второго интервала разность арифметической прогрессии будет  $m_2$ . Поэтому

$$C_2 = (m_2 + H_1) + (H_1 + 2m_2) + (H_1 + 3m_2) + \dots + \left( H_1 + \frac{H_2}{m_2} m_2 \right).$$

Находя сумму этой прогрессии, получаем

$$C_2 = \frac{2H_1 + H_2 + m_2}{2m_2} H_2 \quad (4)$$

и т. д.

Общая длина поднимаемых труб

$$L_0 = \frac{(H_1 + m_1) H_1}{2m_1} + \frac{(2H_1 + H_2 + m_2) H_2}{2m_2} + \frac{2(H_1 + H_2) + H_3 + m_3}{2m_3} H_3 + \dots + \frac{2 \sum_{i=1}^{n-1} H_i + H_n + m_n}{2m_n} H_n. \quad (5)$$

От величины мощности зависит время подъема инструмента, поэтому в нашем случае последний член в выражении (2), определяющий время на подъем незагруженного элеватора при спуске колонны, можно не учитывать.

Если  $H$  — глубина скважины и  $m_3$  — некоторая эквивалентная (приведенная) длина рейса, то общая длина поднятых бурильных труб, согласно уравнению (3), будет  $\frac{H^2 + m_3 H}{2m_3}$ . Приравнивая эту величину к длине бурильных труб  $L_0$  [по уравнению (5)], получаем

$$\frac{H^2 + m_3 H}{2m_3} = L_0. \quad (6)$$

Отсюда

$$m_3 = \frac{H^2}{2L_0 - H}. \quad (7)$$

Необходимость введения  $m_3$  вызвана тем, что определение числа свечей, поднимаемых на каждой скорости с учетом переменной длины рейса, довольно громоздко, хотя решение подобной задачи графическим способом имеется [2]. Однако и предложенный способ дает достаточную для практических целей точность. Длина колонны бурильных труб, подлежащих подъему на какой-либо скорости за весь период бурения скважины, приближенно может быть найдена по формуле

$$L_n = \frac{z_n l^2}{m_3} \left( \frac{z_n}{z} + z_{n-1} + z_{n-2} + \dots + z_1 \right), \quad (8)$$

где  $z_n, z_{n-1}, z_{n-2} \dots z_1$  — предельно возможное и необходимое число свечей, которое можно поднять на соответствующих скоростях  $v_n, v_{n-1}, v_{n-2} \dots v_1$  при наличии двигателя определенной мощности в случае однократного спуско-подъема;  
 $l$  — длина свечи.

В случае использования в станках бесступенчатых передач (например, вариаторов [3]) машинное время спуско-подъема инструмента может быть определено из условия увеличения скорости по мере уменьшения веса бурового снаряда при подъеме. При этом некоторое число свечей должно подниматься на одной максимально допустимой скорости.

Следовательно, число скоростей подъема равно  $z+1$ , где  $z=n-k$  ( $n$  — общее число свечей при конечной глубине скважины;  $k$  — число свечей, поднимаемых на наивысшей скорости).

Машинное время подъема будет складываться из времени подъема  $k$  свечей на наивысшей скорости  $T_k$  времени подъема каждой свечи за весь период бурения скважины и, наконец, времени подъема незагруженного элеватора при спуске инструмента

$$T_k = \frac{lk}{m_3 v_k} \left( H - \frac{lk}{z} \right). \quad (9)$$

Время подъема каждой свечи из расположенных после  $k$ -й

$$T_{k+i} = \left[ \frac{l^2}{2m_3} + \frac{H - l(k+i)}{m_3} l \right] \frac{k+i}{v_k k}, \quad (10)$$

где  $i$  — порядковый номер свечи (после  $k$ -й).

Время подъема незагруженного элеватора

$$T_3 = \frac{H^2 + m_3 l^2}{2m_3 v_k}. \quad (11)$$

Складывая указанные в формулах (9) — (11) элементы машинного времени, имеем

$$T_{\text{мш}} = \alpha \left( T_k + \sum_{i=1}^z T_{k+i} + T_3 \right). \quad (12)$$

После подстановки значений  $T_k, \sum_{i=1}^z T_{k+i}, T_3$  и соответствующих преобразований окончательно получаем

$$T_{\text{мш}} = \alpha \left\{ \frac{lk}{m_3 v_k} \left( H - \frac{lk}{z} \right) + \frac{l}{2m_3 v_k k} \left[ (H - lk)(2k + z + 1) - \right. \right. \\ \left. \left. - l \left( kz^2 + \sum_{i=1}^z (2i - 1)i \right) \right] + \frac{H^2 + m_3 H}{2m_3 v_k} \right\}. \quad (13)$$

Имея теперь все необходимые данные для определения машинного времени спуско-подъема инструмента, можно установить зависимость  $T_{\text{мис}}$  от мощности двигателя. На рис. 1, где представлена эта зависимость, за исходные параметры приняты:  $N_0$  — минимально возможная мощность двигателя;  $T_0$  — машинное время (100%), соответствующее мощности двигателя  $N_0$ . Величина  $N_0$  должна быть достаточной для осуществления процесса бурения на заданных режимах и обеспечения подъема инструмента с конечной глубины на первой скорости. Очевидно, большей мощности  $N_x$  будет соответствовать меньшее отношение  $\frac{T_x}{T_0}$ , отношение  $\frac{N_x}{N_0} = x$  можно назвать степенью увеличения мощности двигателя.

Анализируя кривые рис. 1, можно установить, что наиболее интенсивное снижение машинного времени происходит при 2—4-кратной степени увеличения мощности двигателя. При дальнейшем увеличении  $x$  кривые асимптотически приближаются к некоторому пределу, численная величина которого соответствует машинному времени (или отношению  $\frac{T_x}{T_0}$ ) при подъеме всей колонны на максимальной скорости.

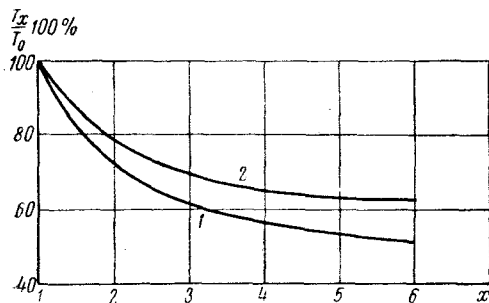


Рис. 1. Зависимость относительной величины машинного времени от мощности двигателя для подъема при глубине скважины: 1 — 500 м; 2 — 1000 м

В практике роторного бурения в СССР и за рубежом в буровых установках для привода лебедки используются двигатели в 2—6 раз большие

по мощности, чем для привода ротора [6, 10, 11], причём имеется тенденция считать, что с глубиной скважин этот разрыв увеличивается [10]. Однако такие диапазоны мощности применительно к установкам разведочного бурения слишком широки. Чрезмерно большая мощность двигателя, хотя и обеспечит эффективную работу по спуско-подъему, но вызовет непропорциональный расход энергии (или горючего) в периоды неполной загрузки, увеличит другие эксплуатационные расходы и вес буровой установки, усложнит перевозку и монтажно-демонтажные работы. Кроме того, при бурении мелких скважин мощность на подъем может быть ниже, чем мощность, идущая на бурение [1]. Поэтому вопрос об окончательном выборе мощности двигателя может быть решен экономическим расчетом [8, 9].

С увеличением мощности двигателя сокращается время на спуско-подъемные операции и, следовательно, в конечном итоге срок окончания бурения скважины. Если обозначить через:  $A$  — величину снижения стоимости работ вследствие уменьшения времени бурения скважины;  $B$  — дополнительную величину эксплуатационных расходов, связанных с применением двигателя большей мощности;  $S_0$  — первоначальную сметную стоимость всех работ по проведению скважины, то, очевидно, что с применением двигателя мощностью  $N_x$  стоимость работ

$$S_x = S_0 - A + B. \quad (14)$$

Путем последовательных вычислений находим значение  $x$ , при котором стоимость работ  $S_x$  будет минимальной.

Мощность двигателя для осуществления спуско-подъемных операций

$$N_{\text{сп}} = N_0 x_{\text{min}}, \quad (15)$$

где  $x_{\text{min}}$  — значение степени увеличения мощности при минимальной стоимости работ<sup>1</sup>.

При вычислении  $S_{x_{\text{min}}}$  учитывается неполная загрузка двигателя в процессе бурения. Это явление может быть устранено надлежащей компоновкой привода. В настоящее время агрегаты, работающие на электрической энергии, имеют индивидуальные приводы к станку и насосу. Такая система обеспечивает независимость работы элементов буровой установки. Но использование мощности двигателя неполное. При установке одного двигателя достаточной мощности коэффициент использования его повышается (исключая кратковременные операции по заклинке керна и чистке скважины). Использование одного двигателя требует применения редуктора, который, кроме веса, увеличивает габариты установки. Отказаться от редуктора можно в том случае, если двигатель установить на раме станка, а освобождение устья скважины при спуско-подъемах инструмента производить не откаткой станка, а поворотом вращателя в сторону. Такая компоновка привода (при использовании двигателя внутреннего сгорания) применяется в настоящее время на некоторых буровых установках, выпускаемых рядом иностранных фирм [5].

Может быть также использован групповой привод при условии разработки легкого и компактного контрпривода. В таком случае при спуско-подъемах будет происходить суммирование крутящих моментов от двигателей станка и насоса.

**Пример.** Произведем расчет мощности, необходимой для осуществления спуско-подъемных операций при бурении скважины в районе Донбасса. Для расчета необходимы следующие величины:

Глубина скважины $H$ . . . . .	800 м
Тип станка . . . . .	ЗИФ-1200А
Диаметр бурильных труб $d$ . . . . .	50 мм
Вес 1 пог. м бурильных труб $q$ . . . . .	6,7 кг
Длина свечи $l$ . . . . .	18 м
Оснастка талей . . . . .	4×3
Максимальные скорости подъема $v_p$ при указанной оснастке (на третьем слое навивки) . . . . .	0,21; 0,40; 0,75; 1,08 м/сек
Эквивалентная длина рейса $m_3$ . . . . .	3 м
Мощность на процесс бурения $N_0$ . . . . .	15 квт
Стоимость бурения 1 пог. м . . . . .	240 руб.
Производительность на станок в месяц $A$ . . . . .	300 пог. м
Первоначальная сметная стоимость работ $S_0$ . . . . .	192 000 руб.
Время работ $T_0$ . . . . .	1730 час
Стоимость 1 квт-ч энергии $p$ . . . . .	0,4 руб.
Коэффициент чистого времени бурения $\xi$ . . . . .	0,4
Время на обработку одной свечи $t_{\text{св}}$ . . . . .	1 мин
К. п. д. передачи от двигателя к лебедке $\eta$ . . . . .	0,85
Вес 36 м тяжелого низа диаметром 73 мм $Q_{\text{т.н}}$ . . . . .	930 кг
Вес подвижной части талевой системы $Q_{\text{т.с}}$ . . . . .	400 кг

Минимально необходимая мощность для подъема снаряда на первой скорости

$$N_0' = \frac{[(L - L_1)q + Q_{\text{т.с}} + Q_{\text{т.н}}] v_1^3}{102\eta} = 19 \text{ квт},$$

<sup>1</sup> Пример вычисления мощности см. ниже.

где  $L_1$  — длина тяжелого низа (для наших условий 36 м), м;  
 $\beta$  — коэффициент, учитывающий возможные прихваты при подъеме,  $\beta = 1,2$  [1].

1. Машинное время спуско-подъема инструмента при  $x=1$ . Предельно возможное число свечей, поднимаемых на различных скоростях, можно рассчитать по формуле

$$z_v = \frac{10 \Sigma N_0 \eta}{q \sigma_n^3 l} - \frac{Q_{т.с} + Q_{т.н}}{lq} \quad (16)$$

и получить для третьей скорости 6 свечей (из них 2 тяжелого низа); для второй — 17 свечей (плюс 2 свечи тяжелого низа); для первой — 42 свечи (плюс 2 свечи тяжелого низа).

Необходимое число свечей при общем количестве  $n=800:18=44$  (из них 2 свечи тяжелого низа): на третьей скорости  $z_3=6$ ; на второй скорости  $z_2=13$ ; на первой скорости  $z_1=25$ .

Длины колонн бурильных труб, поднимаемых на каждой скорости, согласно формуле (6), следующие:

$$L_3 = \frac{z_3 l^2}{m_3} \left( \frac{z_3}{2} + z_2 + z_1 \right) = \frac{6 \cdot 18^2}{3} (3 + 13 + 25) = 26\,600 \text{ м};$$

$$L_2 = \frac{13 \cdot 18^2}{3} (6,5 + 25) = 44\,300 \text{ м};$$

$$L_1 = \frac{25 \cdot 18^2}{3} 12,5 = 33\,800 \text{ м}.$$

Машинное время, найденное по формуле (2),

$$T_{0 \text{ мпс}} = 1,2 \left( \frac{33\,800}{0,21} + \frac{44\,300}{0,4} + \frac{26\,600}{0,75} + \frac{640\,000}{2 \cdot 3 \cdot 1,08} \right) = \\ = 462\,000 \text{ сек} = 135 \text{ час}.$$

2. Вычисляя машинное время подобным же образом для различных  $x$ , находим:  $T_{\text{мпс}1,5} = 101 \text{ час}$ ,  $T_{\text{мпс}2} = 83,7 \text{ час}$ ,  $T_{\text{мпс}2,5} = 74 \text{ час}$ ,  $T_{\text{мпс}3} = 69 \text{ час}$ ,  $T_{\text{мпс}4} = 66 \text{ час}$ .

3. Стоимость работ при различных значениях  $x$  применительно к электродвигателям

$$S_x = S_0 \left( 1 - k_1 \frac{T_0 - T_x}{T_\delta} \right) + N_0 \delta T_\delta (x - 1) + \\ + \left( \frac{1}{\eta_x} - \frac{1}{\eta_0} \right) [T_\delta^2 - (T_0 - T_x)] N_0 p + \frac{2L_0}{l} (N_{xх} - N_{0х}) t_{св} p. \quad (17)$$

где  $k_1$  — коэффициент, учитывающий отношение затрат, зависящих от времени работ, к общей величине стоимости работ; величина  $k_1$  колеблется от 0,5 до 0,7 и зависит от условий и района работ;

$\eta_0$  — к. п. д. электродвигателя мощностью  $N_0$  при номинальной загрузке;

$\eta_x$  — к. п. д. электродвигателя  $xN_0$  при условии загрузки его мощностью  $N_0$ ;

$N_{0х}$  и  $N_{xх}$  — мощности холостого хода двигателей соответственно номинальной мощности  $N_0$  и  $xN_0$ ;

$\delta$  — величина амортизации двигателя на 1 квт мощности в 1 час; по прейскуранту цен на электрические машины для электродвигателей серии АО (односкоростных)  $\delta = 0,0035 \text{ руб/квт-ч}$ .

В формуле (17) первый член учитывает снижение стоимости бурения за счет сокращения срока работ, второй — характеризует увеличение амортизационных отчислений за счет применения двигателя большей мощности, третий и четвертый — увеличение затрат за счет дополнительного расхода электроэнергии (третий член — в процессе бурения, четвертый — в периоды пауз при спуско-подъемах).

Величина  $L_0$  может быть определена по формуле (7). Значения  $\eta_0$ ,  $\eta_x$ ,  $N_{ex}$  могут быть найдены в справочниках либо вычислены по соответствующим формулам (см. Справочник машиностроителя, 1956 г., т. 2, стр. 394—399).

Стоимости работ [по формуле (17)] для различных  $x$ :

$$\begin{aligned} S_{1,5} &= 190\,500 \text{ руб.}; S_2 = 189\,900 \text{ руб.}; \\ S_{2,5} &= 190\,150 \text{ руб.}; S_3 = 190\,400 \text{ руб.}; \\ S_4 &= 191\,900 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Область минимальных затрат находится при  $x = 1,75-2$  (рис. 2).

Следовательно, мощность двигателя для осуществления спуско-подъемных операций для указанных условий должна быть 33—38 квт, т. е. может быть использован имеющийся электродвигатель станка ЗИФ-1200А.

Отметим, что в формуле (17) не учтены дополнительные затраты на монтаж и перевозку двигателя в связи с увеличением его мощности и веса, а также возможность повторно-кратковременной перегрузки при подъеме [4]. В то же время для разведочных буровых установок весьма важными являются вопросы транспортабельности, веса, простоты и надежности конструкции. Прочность узлов станка тесно связана с мощностью устанавливаемого для его привода двигателя. Многократное увеличение мощности двигателя не дает ощутимого экономического эффекта. Поэтому практически целесообразно увеличивать мощность двигателя более чем в 1,5—2 раза по отношению к  $N_0$ .

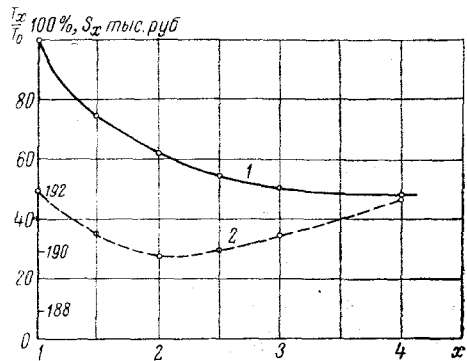


Рис. 2. Зависимость стоимости буровых работ от мощности двигателя для подъема:

$$1 - \frac{T_x}{T_0} = f(x); 2 - S_x = \varphi(x)$$

## Выводы

1. Для успешного проведения разведочных скважин привод буровой установки должен обеспечивать не только ведение процесса бурения на заданных технологических режимах, но и удовлетворять условиям эффективного производства подъемных операций.

2. При увеличении мощности двигателя машинное время спуско-подъема уменьшается, изменяясь по гиперболическому закону. Наиболее интенсивное снижение наблюдается в области, соответствующей 2—4-кратному увеличению мощности. Рациональное значение мощности двигателя для осуществления подъемных операций может быть уточнено экономическим расчетом.

Практически более чем 1,5—2-кратная степень увеличения мощности двигателя для станков разведочного бурения малоцелесообразна.

3. Для лучшего использования мощности выбранного электродвигателя в периоды неполной загрузки следует изменить систему компоновки

привода: а) применением группового привода с суммированием мощностей в периоды подъема инструмента, б) установкой двигателя на раме станка с возможностью одновременного привода насоса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воздвиженский Б. И. и Волков С. А. Разведочное колонковое бурение. Госгеолтехиздат, 1957.
2. Ильский А. Л. Расчет и конструирование бурового оборудования. Гостоптехиздат, 1957.
3. Коркин Ю. М. Бесступенчатые передачи для буровых станков. «Разведка и охрана недр», 1957, № 2.
4. Междумов А. А. Формулы для определения мощности подъемных буровых электродвигателей. «Энергетический бюлл.», 1950, № 5.
5. Матреницкий Т. Т., Бубнов Е. С. Геологоразведочное буровое оборудование и инструмент на Всемирной Выставке в 1958 году в Брюсселе. «Бюлл. научно-техн. информации МГ и ОН СССР», 1959, № 4(21).
6. Новые машины и механизмы для бурения нефтяных и газовых скважин. ГОСИНТИ, 1958.
7. Середа Н. Г. Определение затраты времени на спуско-подъемные работы в бурении. Тр. Моск. нефт. ин-та, 1957, вып. 20.
8. Федоров В. С. и Никаноров М. М. Теоретические основы подъема бурового инструмента. Гостоптехиздат, 1952.
9. Эпштейн Е. Ф. Методы расчета некоторых параметров буровой установки и режима колонкового разведочного бурения. Изв. Днепропетровского горного ин-та, 1957, т. 30, кн. 1.
10. Брентли Д. Справочник по вращательному бурению. Пер. с английского. Гостоптехиздат, 1957.
11. New rocky mountain rig is big, modern and fast moving. Oil and Gas. J., 1956, v. 54, N 65.