ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ № 3, 2013, 53-60

УДК 622.233

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШНЕКОВОГО БУРЕНИЯ

Часть 2. Производительность и методика расчета ее характеристик

Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Нагорский А.В. (Белорусский национальный технический университет), Шульдова С.Г. (Институт управления, г. Минск, Беларусь), Ярмолинский В.К. (ЧУП «Институт горного дела», г. Солигорск)

Работа является продолжением исследования процесса шнекового бурения на основе соблюдения законов сохранения [1]. Здесь рассмотрены условия и получены расчетные зависимости для обеспечения баланса производительности в процессе шнекового бурения. Полученные зависимости позволяют определить режимные параметры процесса бурения в условиях обеспечения баланса производительности.

Введение

В первой части настоящей работы получены зависимости, позволяющие определить затраты мощности на разрушение породы инструментом разрушения и ее подъем. При этом предполагается, что буровой став работает в стационарном режиме и выполняются законы сохранения, выражающиеся через уравнения балансов мощности и производительности. Для составления уравнения баланса мощности приведены все необходимые расчетные зависимости. Вместе с тем, некоторые особенности шнекового бурения в части соблюдения баланса производительности и, тем более, совместного выполнения условий обеспечения балансовых соотношений по мощности и производительности, требуют дополнительных исследований, чему и посвящается предлагаемая статья.

Исследование балансового соотношения по производительности

Устойчивость процесса шнекового бурения достигается при выполнении условий достаточности мощности привода исполнительных органов, а также производительности шнека. Последнее условие запишем в виде:

$$Q_ш \geq Q_д, \tag{1}$$

где $Q_ш$ – производительность шнека как органа, транспортирующего разрушенную долотом горную массу;

$Q_д$ – производительность по разрушенной горной массе (по долоту).

Производительность шнека как транспортирующего органа в нормальном режиме фактически всегда равна производительности по разрушенной массе. Поэтому условие (1) предполагает, что максимальная производительность шнека всегда больше производительности органа разрушения. Производительность органа разрушения в объемном исчислении:

$$Q_д = v_п \cdot \pi \cdot R_2^2, \tag{2}$$

где $v_п$ – скорость подачи органа разрушения на забой (теоретическая скорость);

R_2 – радиус скважины, который принимаем равным наружному радиусу шнека.

Что касается производительности шнека, то ее можно выразить несколькими способами. Сначала воспользуемся формулой, выражающей ее через объем транспортируемой породы в осевом направлении с учетом разрыхления при разрушении, а также степени заполнения рабочего объема шнека, т.е. при исчислении по объему породы в массиве:

$$Q_ш = \frac{K_V}{K_р}\pi\left(R_2^2 - R_1^2\right)v_{ос}, \qquad (3)$$

где K_V – коэффициент заполнения рабочего пространства шнека породой;

$K_р$ – коэффициент разрыхления породы;

$v_{ос}$ – средняя скорость перемещения породы в осевом направлении.

Эту скорость определим, исходя из допущений о постоянстве соотношения между средней угловой скоростью породы и угловой скоростью шнека. Очевидно, что устойчивое транспортирование породы предполагает выполнение такого соотношения. В этом случае можно записать:

$$\omega_{вп} = \omega_в - \omega_п = \omega_в\left(1 - \frac{\omega_п}{\omega_в}\right), \qquad (4)$$

где $\omega_п$ – средняя угловая скорость породы;

$\omega_{вп}$ – угловая скорость шнека относительно породы, находящейся на витках шнека;

$\omega_в$ – угловая скорость шнека.

Обозначим:

$$\frac{\omega_п}{\omega_в} = \varphi, \quad а \quad 1 - \frac{\omega_п}{\omega_в} = 1 - \varphi = \psi, \qquad (5)$$

где φ – коэффициент скольжения;

ψ – коэффициент циркуляции.

В литературе встречается в зависимости от удобства использования применение обоих коэффициентов [2, 3].

С учетом этих обозначений осевая скорость породы относительно шнека:

$$v_{ос\,в} = \omega_{вп}\frac{h_в}{2\pi} = \omega_в\left(1-\varphi\right)\frac{h_в}{2\pi} = \psi\cdot\omega_в\frac{h_в}{2\pi}. \qquad (6)$$

где $v_{ос\,в}$ – скорость перемещения породы относительно шнека в осевом направлении;

$h_в$ – шаг винта шнекового конвейера.

Тогда осевая скорость породы относительно скважины:

$$v_{ос} = v_{ос\,в} - v_п = \frac{\left(1-\varphi\right)\omega_в\cdot h_в - 2\pi\cdot v_п}{2\pi}, \qquad (7)$$

а производительность шнека по транспортируемой породе можно определить выражением:

$$Q_{ш} = S_{с} \frac{K_{с}}{K_{р}} v_{ос}, \tag{8}$$

где $S_{с} = \pi\left(R_2^2 - R_1^2\right)$ – площадь сечения шнека плоскостью, перпендикулярной оси вращения;

$K_{с}$ – коэффициент заполнения этого сечения породой.

Учитывая, что увеличение объема, занимаемого разрушенной породой, возможно только в осевом направлении, считаем $K_{с} = K_{V}$.

Тогда условие обеспечения производительности:

$$S_{с} \frac{K_{с}}{K_{р}} \left(h_{в} \cdot \omega_{в} \frac{1-\varphi}{2\pi} - v_{п} \right) \geq v_{п} \cdot \pi \cdot R_2^2. \tag{9}$$

Из этого условия имеем предельное соотношение между угловой скоростью вращения шнека и скоростью подачи долота на забой:

$$\omega_{в} \geq \frac{2\pi \cdot v_{п}}{(1-\varphi) h_{в}} \left[1 + \frac{R_2^2 \cdot K_{р}}{K_{с}\left(R_2^2 - R_1^2\right)} \right]. \tag{10}$$

Можно пользоваться и приближенным значением $\omega_{в} \geq \frac{2\pi \cdot v_{п}}{(1-\varphi) h_{в}} \left(1 + \frac{K_{р}}{K_{с}} \right)$.

Это условие не является единственным. Не менее важным и необходимым является условие обеспечения скольжения породы относительно шнека или, иначе, отсутствие полного вращения породы вместе со шнеком. Это условие можно выразить соотношением:

$$\tau_{2x} < f_2 \cdot p_2, \tag{11}$$

где τ_{2x} – проекция напряжения между транспортируемой горной массой и стенками скважины на касательную к поверхности скважины;

f_2 – коэффициент трения между поднимаемой породой и стенками скважины;

p_2 – давление транспортируемой породы на стенки скважины.

Так как

$$\tau_{2x} = f_2 \cdot p_2 \cdot \cos\gamma_{2п}, \tag{12}$$

где $\gamma_{2п}$ – угол между направлением абсолютной скорости породы на наружном радиусе шнека и плоскостью, перпендикулярной оси вращения шнека;

то условие (11) принимает вид $\cos\gamma_{2п} < 1$, или

$$\frac{\varphi \cdot \omega_{в} \cdot R_2}{\sqrt{\left(\varphi \cdot \omega_{в} \cdot R_2\right)^2 + v_{ос\,в}^2}} < 1. \tag{13}$$

Это соотношение приводит к очевидному условию обеспечения движения породы в осевом направлении:

$$\varphi = \omega_{п} / \omega_{в} < 1 . \qquad (14)$$

Для осевого движения породы также необходимо, чтобы давление породы на стенку скважины было положительным, то есть:

$$p_2 > 0 . \qquad (15)$$

Это условие выполняется в том случае, когда давление от сил инерции превышает напряжение трения породы о лопасти шнека. Таким образом, еще одно условие транспортирования породы шнеком можно записать в виде:

$$p_{и} > f_1 \cdot p_{н} , \qquad (16)$$

где $p_{и}$ – давление породы на стенки скважины, вызванное силами инерции;

f_1 – коэффициент трения породы о лопасть;

$p_{н} = f_2 \cdot p_2 \sin\gamma_2$ – давление породы на лопасть шнека;

f_2 – коэффициент трения транспортируемой породы о стенки скважины;

p_2 – давление породы на стенку скважины.

Нормальное давление на лопасть от действия сил тяжести выражается:

$$p_{т} = \frac{\rho \cdot g \cdot h'_{сл}}{\cos\gamma_{ср}} ,$$

где $h'_{сл}$ – средняя высота слоя породы на лопасти шнека без учета разрыхления.

Давление на стенки скважины от сил инерции, возникающее из-за вращения породы, зависит как от угловой скорости породы, так и от положения центра масс витка породы относительно оси вращения.

Радиус $R_{п}$ положения центра масс витка породы найдем из условия, что половина массы породы сосредоточена на радиусах, меньших $R_{п}$, а вторая – на радиусах, больших $R_{п}$. Это условие запишем в виде:

$$\int_0^{(2\pi-\alpha)} \int_{R_1}^{R_{п}} \rho' \cdot r \cdot d\beta \cdot dr \cdot h_{сл} = \int_0^{(2\pi-\alpha)} \int_{r_{п}}^{R_2} \rho' \cdot r \cdot d\beta \cdot dr \cdot h_{сл} . \qquad (17)$$

где $\rho' = \rho / K_{р}$ – плотность разрыхленной породы.

Откуда находим:

$$R_{п} = \sqrt{\frac{R_2^2 + R_1^2}{2}} . \qquad (18)$$

Тогда дифференциал силы инерции $P_и$ транспортируемой горной массы (рисунок):

$$dP_и = dm \cdot \omega_п^2 \cdot R_п = \rho' \cdot r \cdot dr \cdot d\beta \cdot dh_{сл} (\varphi \cdot \omega_в)^2 \cdot r_п, \quad (19)$$

где m – масса породы;

r, β – текущие значения радиуса и угла положения породы на витке.

Этот дифференциал можно определить и так:

$$dP_и = \frac{1}{2} \rho' \cdot \left(R_2^2 - R_1^2\right)(\varphi \cdot \omega_в)^2 \cdot h_{сл} \cdot d\beta. \quad (20)$$

Тогда давление на стенки скважины от сил инерции:

$$p_и = \frac{dP_и}{dS_2} = \frac{1}{2} \frac{\rho\left(R_2^2 - R_1^2\right)}{R_2} (\varphi \cdot \omega_в)^2 \cdot \sqrt{\frac{R_2^2 + R_1^2}{2}}, \quad (21)$$

где $dS_2 = h_{сл} \cdot R_2 \cdot d\beta$ – дифференциал площади соприкосновения транспортируемой породы со стенкой скважины с учетом разрыхления породы.

Среднюю высоту слоя породы на лопасти шнека определим из условия (рисунок):

$$K_с = h_{сл} / h_в, \quad (22)$$

где $K_с$ согласно (9) определяется выражением:

$$K_с = \frac{2\pi \cdot K_р \cdot v_п \cdot R_2^2}{\left(R_2^2 - R_1^2\right)\left((1-\varphi) h_в \cdot \omega_в - 2\pi \cdot v_п\right)}. \quad (23)$$

Таким образом,

$$h_{сл} = \frac{2\pi \cdot v_п \cdot K_р \cdot R_2^2 \cdot h_в}{\left(R_2^2 - R_1^2\right)\left((1-\varphi) h_в \cdot \omega_в - 2\pi \cdot v_п\right)}, \quad (24)$$

Без большой погрешности можно пользоваться приближенной формулой, которая получается при пренебрежении величиной R_1^2 по сравнению с R_2^2,

$$h_{сл} = \frac{2\pi \cdot v_п}{(1-\varphi) h_в \cdot \omega_в - 2\pi \cdot v_п}, \quad (25)$$

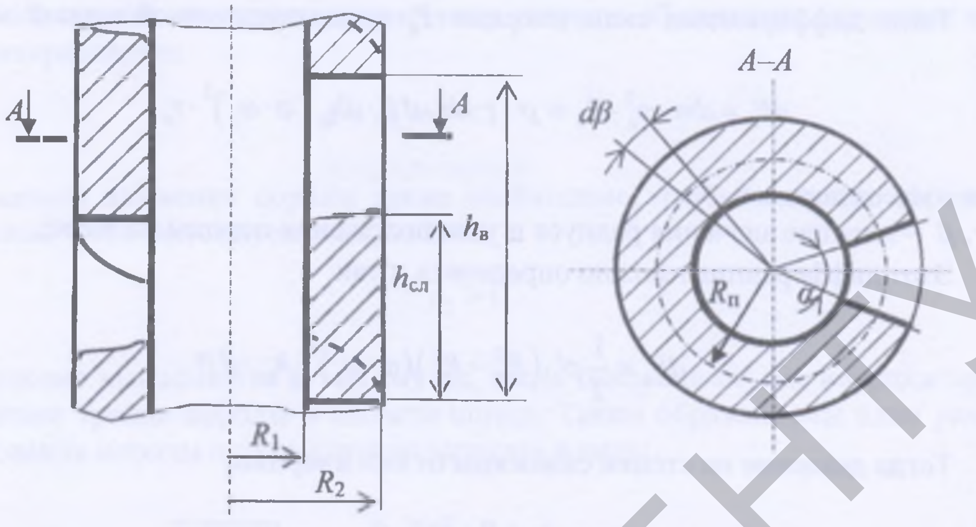

Рисунок – К определению средней высоты слоя породы на лопасти шнека

Учитывая то, что осевое движение породы по скважине начинается лишь после ее сдвига в радиальном направлении, т.е. после возникновения ее давления на стенки скважины, условие начала этого сдвига запишем в виде:

$$\frac{1}{2}\rho'\cdot\varphi^2\cdot\omega_в^2\cdot\rho\frac{R_2^2-R_1^2}{R_2}\sqrt{\frac{R_2^2+R_1^2}{2}} \ge f_1\cdot\rho'\cdot g\cdot h_{сл}\cdot\cos\gamma_п, \qquad (26)$$

где $\gamma_п$ – средний угол подъема траектории витка породы.

Приняв $h_{сл}=h_в$ и определив $\cos\gamma_п=\frac{2\pi\sqrt{\frac{R_2^2+R_1^2}{2}}}{\sqrt{2\pi^2\left(R_2^2+R_1^2\right)+h_в^2}}$ можно определить значение так называемой критической угловой скорости шнека:

$$\omega_{в\,кр}=\frac{2}{\varphi}\sqrt{\frac{f_1\cdot\pi\cdot g\cdot h_в\cdot R_2^2}{\left(R_2^2-R_1^2\right)\sqrt{2\pi^2\left(R_2^2+R_1^2\right)+h_в^2}}}, \qquad (27)$$

или по приближенной формуле:

$$\omega_{в\,кр}=\frac{2}{\varphi}\sqrt{\frac{f\cdot\pi\cdot g\cdot h_в}{\sqrt{2\pi^2\cdot R_2^2+h_в^2}}}. \qquad (28)$$

Входящий в расчетные зависимости коэффициент заполнения рабочего пространства шнека можно определить расчетным путем по известной высоте витка породы на шнеке. Действительно, коэффициент заполнения можно определить отношением:

$$K_с = K_V = \frac{h_{сл}}{h_в}. \quad (29)$$

С другой стороны:

$$h_в - h_{сл} = \alpha \cdot R_2 \cdot tg\gamma_2, \quad (30)$$

где $\gamma_2 = arctg\,\frac{h_в}{2\pi \cdot R_2}$ – угол подъема наружной винтовой линии шнека;

α – угол сектора отсутствия породы в сечении, перпендикулярном оси вращения.

Таким образом:

$$h_в - h_{сл} = h_в \cdot \frac{\alpha}{2\pi}, \quad (31)$$

и

$$h_{сл} = h_в\left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right), \quad (32)$$

Тогда $K_с = 1 - \frac{\alpha}{2\pi}$,

где

$$\alpha = \frac{h_в - h_{сл}}{R_2 \cdot tg\gamma_2} = 2\pi\left(1 - \frac{h_{сл}}{h_в}\right). \quad (33)$$

Полученные соотношения позволяют найти расчетное значение коэффициента скольжения породы по лопасти шнека из равенства производительности по ходу и по шнеку. Действительно, приравняв (2) и (10) найдем:

$$v_{ос} = \frac{\pi \cdot v_п \cdot R_2^2 \cdot K_р}{K_с\left(R_2^2 - R_1^2\right)}. \quad (34)$$

Используя теперь (7), имеем:

$$\varphi = 1 - \frac{2\pi \cdot v_п\left(K_р \cdot R_2^2 + K_с\left(R_2^2 - R_1^2\right)\right)}{K_с\left(R_2^2 - R_1^2\right)h_в \cdot \omega_в} \cong 1 - \frac{2\pi \cdot v_п\left(K_р + K_с\right)}{K_с \cdot h_в \cdot \omega_в}. \quad (35)$$

Возвращаясь к (10) можно записать еще одно условие, выполнение которого необходимо при нормальном бурении. Это условие заключается в том, что осевая скорость породы должна быть положительной, то есть:

$$\omega_в(1-\varphi)\frac{h_в}{2\pi} - v_п > 0, \quad (36)$$

или $\omega_в(1-\varphi)h_в > 2\pi \cdot v_п$, а при полном отсутствии вращения породы:

$$\omega_в \cdot h_в > 2\pi \cdot v_п. \quad (37)$$

Это условие является первичным при выборе $\omega_в$ и $v_п$.

Заключение

Таким образом, сформированы все основные соотношения между геометрическими, кинематическими и физическими величинами, характеризующими процесс шнекового бурения при проходке вертикальных скважин. Эти зависимости приведены в аналитическом виде так, что при расчетах надо задаваться величиной коэффициента заполнения сечения шнека плоскостью, перпендикулярной оси вращения. Величина этого коэффициента, конечно, зависит от свойств буримых пород и может быть выбрана из рекомендуемых [4] значений. Вместе с тем, необходимо отметить, что этот коэффициент представляет собой запас производительности транспортирующего шнека.

При проходке наклонных скважин зависимости, полученные в статье, также могут быть положены в основу расчета. Однако они должны быть модернизированы с учетом угла наклона скважины.

Список использованных источников

1. **Казаченко, Г.В.** Исследование процесса шнекового бурения. Часть 1. Формирование математической модели рабочего процесса в установившемся режиме бурения / Г.В. Казаченко, А.В. Нагорский, Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 65-74.

2. **Опейко**, Ф.А. Торфяные машины / Ф.А. Опейко. – Минск: Вышэйшая школа, 1968. – 408 с.

3. **Морев**, А.Б. Горные машины для калийных рудников / А.Б. Морев, А.Д. Смычник, Г.В. Казаченко. – Минск: Итеграполиграф, 2009. – 544 с.

4. **Ребрик**, В.М. Справочник по бурению инженерно-геологических скважин / Б.М. Ребрик. – М.: Недра, 1983. – 288 с.

Kazachenko G.V., Basalai G.A., Nagorsky A.V., Shuldova S.G., Jarmolinsky V.K.

Phenomenology of auger drilling. Part 2. Efficiency and calculation methods in steady-state of drilling

The article is a continuation of phenomenology of auger drilling on the bases of observance of conservation laws. Conditions are considered and calculating dependences are obtained for ensuring the efficiency balance in the process of auger drilling. The obtained dependences allow determining the mode parameters of drilling in the conditions of ensuring the efficiency balance.

Поступила в редакцию 19.08.2013 г.