УДК 622. 23. 054.53

А.В. Евстратова

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА БУРОВОЙ МЕЛОЧИ ПО ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШНЕКА ПРИ БУРЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Семинар № 20

Процессу вертикального винтового транспортирования буровой мелочи посвящено значительное количество исследований, как отечественных, так и зарубежных. К ним можно отнести работы Л.М. Александра, Д.Н. Башкатова, А.М. Григорьева, Е.М. Гутьяра, Б.А. Катанова, В.И. Мурашова, S. Bottcher, U. Rieman, W. Suhadi, I. Parsons.

Изучая процесс движения частиц буровой мелочи по вертикальному шнеку, почти все исследователи пришли к выводу, что это сложный процесс, зависящий от большого числа различных факторов, к числу которых можно отнести: радиус и угол подъема шнековой лопасти, скорость вращения шнека, коэффициенты трения продуктов бурения о шнековую лопасть и о внутреннюю цилиндрическую поверхность скважины. Процесс транспортирования буровой мелочи возможен лишь при определенных сочетаниях этих параметров. В противном случае транспортирование ухудшается или совсем прекращается, что приводит к ведению бурения с большими энергозатратами, а в конечном итоге – к аварийным ситуациям, т.е., заклиниванию буровой штанги и прекращению бурения из – за накопления буровой мелочи в скважине.

В настоящее время точное математическое описание процесса вертикального винтового транспортирования потока буровой мелочи отсутствует. Большинство исследований основано на расчетной схеме, согласно которой движение потока продуктов бурения в шнеке заменяется движением сосредоточенной массы, т.е. частицы, опирающейся на поверхность шнековой лопасти и прижатой к внутренней цилиндрической поверхности скважины. Частица породы, опирающаяся на винтовую поверхность шнека и прижатая к стенке скважины, для вертикального шнека в стационарном режиме (рис.1) имеет движение, описываемое дифференциальными уравнениями [1]:

$$\left.\begin{aligned} &N_ш \cos\alpha - f_ш N_ш \sin\alpha - f_ц N_ц \cos\beta - \\ &-mg = 0; \\ &f_ц N_ц \sin\beta - f_ш N_ш \cos\alpha - N_ш \sin\alpha = 0; \\ &-N_ц + mR\omega_0^2 \left[\frac{\sin\alpha \sin\beta}{\cos(\beta-\alpha)}\right]^2 = 0 . \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $N_ш$ - нормальная реакция лопасти шнека; $f_ш$ - коэффициент трения породы о лопасть шнека; $N_ц$ - нормальная реакция цилиндрической поверхности скважины; $\alpha = arctg\dfrac{t}{2\pi R}$ - угол подъема винтовой линии шнека по наружному

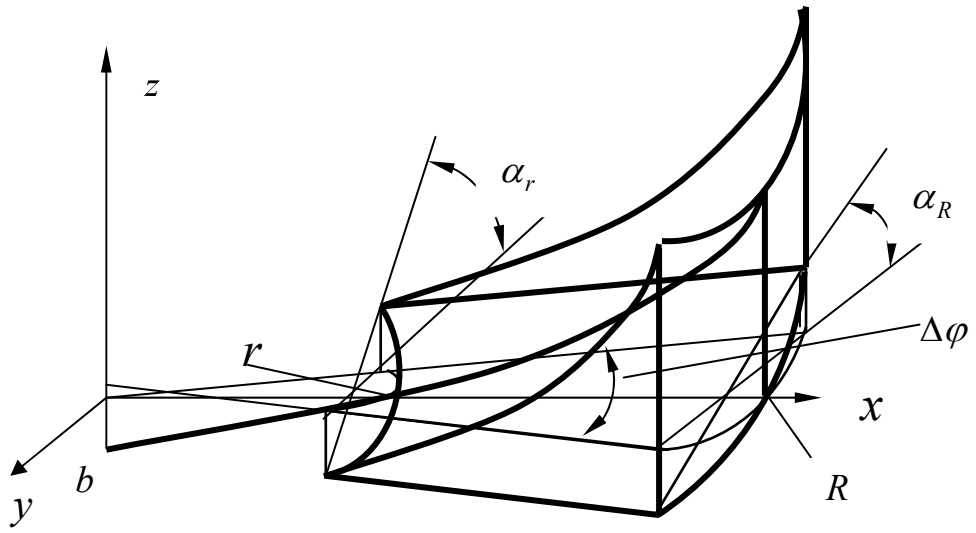

Рис. 1. Объем породы на секторе шнековой лопасти

радиусу; $t = 2\pi R tg\alpha$ - шаг шнека; R - радиус лопасти шнека; m - масса частицы породы; $f_ц$ - коэффициент трения породы о стенку скважины; β - угол между вектором абсолютной скорости $\bar{v}$ частицы породы и осью шнека.

Решение системы (1) дает условие для определения угла β между вектором абсолютной скорости движения частицы породы и осью шнека:

$$\frac{R\omega_0^2 f_ц}{g}\left[\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\cos(\beta-\alpha)}\right]^2 - \frac{f_ш + tg\alpha}{\sin\beta(1 - f_ш tg\alpha) - \cos\beta(f_ш + tg\alpha)} = 0 \,. \quad (2)$$

Анализ количественных результатов процесса транспортирования, полученных при решении уравнения (2) с применением вычислительной техники, показывает, что на эффективность транспортирования существенное влияние оказывают геометрические и кинематические параметры рабочих органов шнека (радиус и угол подъема шнековой лопасти и частота вращения шнека) и коэффициенты трения породы о шнек и цилиндрическую поверхность скважины. Очевидно, что качественная картина движения потока буровой мелочи будет аналогична движению частицы породы, но при этом количественные показатели, характеризующие эффективность процесса транспортирования будут существенно отличаться [2].

Рассмотрим равновесие элементарного объема буровой мелочи, занимающего сектор лопасти шнека с центральным углом $d\varphi$ (рис. 1). При переходе от движения частицы породы к движению потока породы необходимо установить форму поперечного сечения потока. Если рассматривать поток движущейся буровой мелочи как поток движущейся жидкости, то уравнение свободной поверхности потока, из условия равенства давлений во всех точках этой поверхности, имеет следующий вид:

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 x^2}{2g} \quad \text{или} \quad z = ax^2 + b \,. \qquad (3)$$

Для определения координаты точки пересечения проекции свободной поверхности потока буровой мелочи с лопастью шнека r, рассмотрим равновесие частицы породы в этой точке. Будем считать, что данная частица находится на свободной поверхности потока, опирается на шнековую лопасть на расстоянии r от оси шнека, прижата к потоку породы и совершает движение по концентрическим окружностям с угловой частотой вращения шнека ω_0.

Уравнения движения частицы имеют следующий вид

$$\left.\begin{aligned} &N_ш \cos\alpha_r + f_ш N_ш \sin\alpha_r + f_м N_м \sin\alpha_r - \\ &-mg = 0 \\ &f_м N_м \cos\alpha_r + f_ш N_ш \cos\alpha_r - N_ш \sin\alpha_r = 0; \\ &-N_м + mr\omega_0^{\ 2} = 0, \end{aligned}\right\}$$

где $\alpha_r = arctg\left(\frac{R}{r} tg\alpha_R\right)$ - угол подъема винтовой лопасти на расстоянии r от оси шнека. Решение данной системы совместно с уравнением (3) дает условие для определения координаты точки пересечения проекции свободной поверхности потока породы с лопастью шнека:

$$f_м \omega_0^2 r^2 - f_ш (f_м R\omega_0^2 tg\alpha_R + g)r - gRtg\alpha_R = 0 \quad . \qquad (4)$$

Так как угловые скорости абсолютного вращательного движения всех точек потока породы равны, то

$tg\alpha_{ц.м.} tg\beta_{ц.м.} = tg\alpha_R tg\beta_R$ или

$$tg\beta_{ц.м.} = \frac{\rho_{ц.м.}}{R} tg\beta_R$$

Так как угол подъема винтовой линии шнека изменяется в зависимости от расстояния от оси буровой штанги, для описания движения потока породы заменим в уравнениях (1) проекции нормальной реакции лопасти шнека на произведения давления породы на горизонтальную и вертикальную проекции сектора лопасти шнека

$$N_ш \sin\alpha_\rho = P_ш S_{верт};$$

$$N_ш \cos\alpha_\rho = P_ш S_{гор}. \qquad (5)$$

С учетом (5) систему (1) можно записать в следующем виде

$$\left.\begin{aligned} &P_ш S_{гор} - f_ш P_ш S_{верт} - f_ц P_ц S_ц \cos\beta_R - \\ &-\gamma V = 0 \\ &f_ц P_ц S_ц \sin\beta_R - f_ш P_ш S_{гор} - P_ш S_{верт} = 0; \\ &-P_ц S_ц + \frac{\gamma}{g} V \rho_{ц.м.} \omega_0^2 \left(\frac{\sin\alpha_{ц.м.} \sin\beta_{ц.м.}}{\cos(\beta_{ц.м.} - \alpha_{ц.м.})}\right)^2 = \\ &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где $P_ш$ - давление объема породы, расположенного на секторе лопасти $\Delta\varphi$ на лопасть шнека; $S_{верт}$- проекция сектора лопасти $\Delta\varphi$ на вертикальную плоскость; $S_{гор}$ - проекция сектора лопасти $\Delta\varphi$ на горизонтальную плоскость; $P_ц$ - давление рассматриваемого объема породы на цилиндрическую поверхность скважины; $S_ц$ - площадь контакта рассматриваемого элемента материала с цилиндрической поверхностью скважины; V - объем породы, расположенной на секторе лопасти $\Delta\varphi$; $\rho_{ц.м.}$ - расстояние от оси шнека до центра масс рассматриваемого элемента породы.

Площадь горизонтальной проекции сектора лопасти с центральным углом $\Delta\varphi$ на участке от r до R (рис. 2)

$$S_{гор} = \int_r^R x\Delta\varphi dx = \frac{R^2 - r^2}{2}\Delta\varphi. \qquad (7)$$

Площадь вертикальной проекции сектора лопасти с центральным углом $\Delta\varphi$ на участке от r до R (рис. 2).

$$S_{верт} = \int_r^R xtg\alpha_x \Delta\varphi dx.$$

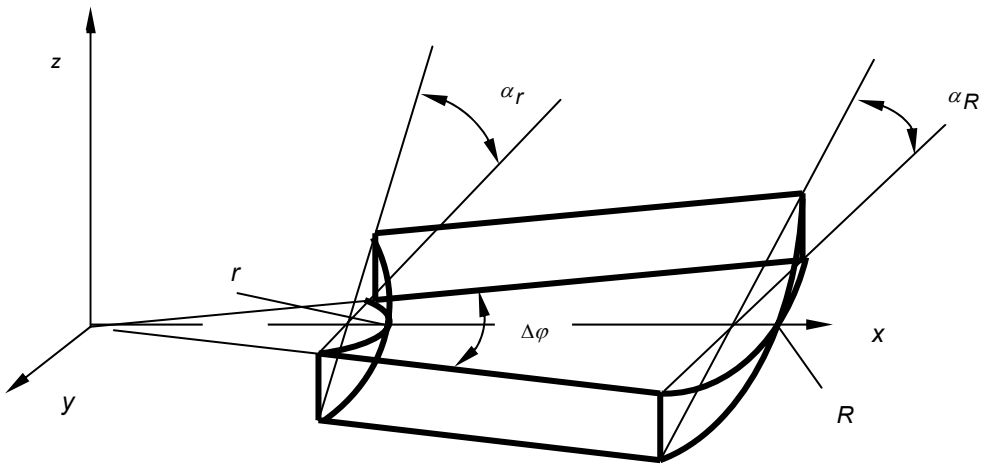

Рис. 2. Сектор лопасти шнека и его проекции на горизонтальную и вертикальную плоскости

Так как $xtg\alpha_x = h = const$, имеем

$$S_{верт} = \int_r^R h\Delta\varphi dx = h(R-r)\Delta\varphi = \\ = R(R-r)tg\alpha_R\Delta\varphi \qquad (8)$$

Объем породы, расположенный на секторе лопасти $\Delta\varphi$ (рис. 1) равен объему материала, представляющего собой часть объема тела вращения, образованного плоскостью xOy, цилиндрической поверхностью, образованной вращением вокруг оси Z вертикальных образующих, проходящих через точки плоскости xOy графика функции $y^2 + x^2 = R^2$ и криволинейной поверхностью, образованной вращением вокруг оси Z графика функции $z = f(x)$ или $z = a(x^2 + y^2) + b$.

Объем сектора породы определяется по формуле [3]

$$V = \int_S\int f(\rho)d\rho d\theta = \int_0^{\Delta\varphi} d\theta \int_r^R f(\rho)\rho d\rho = \\ = \left[(R^2 + r^2)a + 2b\right]\frac{R^2 - r^2}{4}\Delta\varphi \qquad (9)$$

где $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $x = \rho\cos\theta$; $y = \rho\sin\theta$.

Координата центра масс сектора породы, с учетом (9) определяется по формуле [3]

$$\rho_c = \frac{\int_V xdv}{V} = \frac{\int_0^{\Delta\varphi}\int_r^R f(\rho)\rho^2\cos\theta d\rho d\theta}{\int_0^{\Delta\varphi}\int_r^R f(\rho)\rho d\rho d\theta} = \\ = \frac{\sin\Delta\varphi\int_r^R (a\rho^2 + b)\rho^2 d\rho}{\Delta\varphi\int_r^R (a\rho^2 + b)\rho d\rho}.$$

При бесконечно малом $\Delta\varphi$ отношение $\frac{\sin\Delta\varphi}{\Delta\gamma} \approx 1$.

Тогда после интегрирования

$$\rho_c = \frac{\frac{a}{5}\left(R^5 - r^5\right) + \frac{b}{3}\left(R^3 - r^3\right)}{\frac{R^2 - r^2}{4}\left[a\left(R^2 + r^2\right) + 2b\right]}. \qquad (10)$$

После подстановки (7 - 10) в систему (6) получаем условие для определения угла β между продольной осью буровой штанги и направлением движения транспортируемой породы

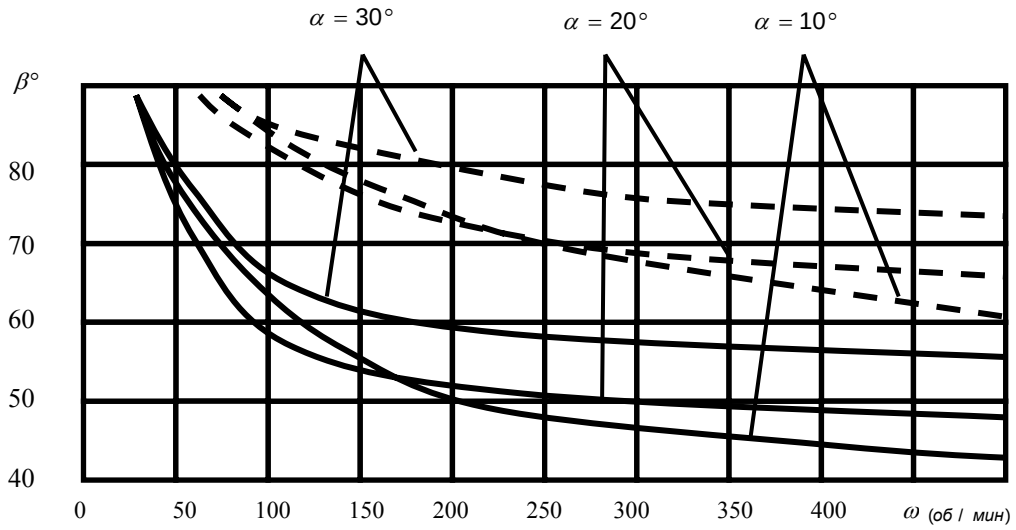

Рис. 3. Зависимости направления движения частицы и потока породы в вертикальном шнеке от угловой скорости вращения буровой штанги при различных значениях угла подъема винтовой линии шнековой лопасти:

——— - частица породы; – – – – - поток породы

$$\frac{f_ц \rho_c \omega_0^2}{g}\left[\frac{\sin\alpha_c \sin\beta_c}{\cos(\beta_c - \alpha_c)}\right]^2 - ,$$
$$-\frac{f_ш S_{гор} + S_{верт}}{(S_{гор} - f_ш S_{верт})\sin\beta_R - (S_{верт} + f_ш S_{гор})\cos\beta_R} = 0 \tag{11}$$

где углы β_c и β_R связаны соотношением $tg\beta_c = \frac{\rho_c}{R} tg\beta_R$.

Исследование зависимостей (2) и (11) позволяет установить влияние на направление движения частицы и потока породы физико-механических свойств транспортируемой буровой мелочи, геометрических и кинематических параметров шнековой лопасти буровой штанги, и провести их сравнительный анализ.

На рис. 3 представлены зависимости направления движения частицы и потока породы в вертикальной скважине от угловой скорости вращения буровой штанги при различных значениях угла подъема винтовой линии шнековой лопасти α. Коэффициенты трения транспортируемой породы о шнек и стенки скважины $f_ш = f_ц = 0,5$. Радиус лопасти шнека $R = 0,5 м$.

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением угловой скорости вращения шнека увеличивается поступательная составляющая движения породы в направлении транспортирования, как при движении частицы, так и при движении потока породы. При этом количественные показатели процесса движения частицы и потока породы существенно отличаются.

Угол β между направлением вектора абсолютной скорости и продольной осью буровой штанги для потока породы значительно больше аналогичного параметра для частицы породы, лежа-

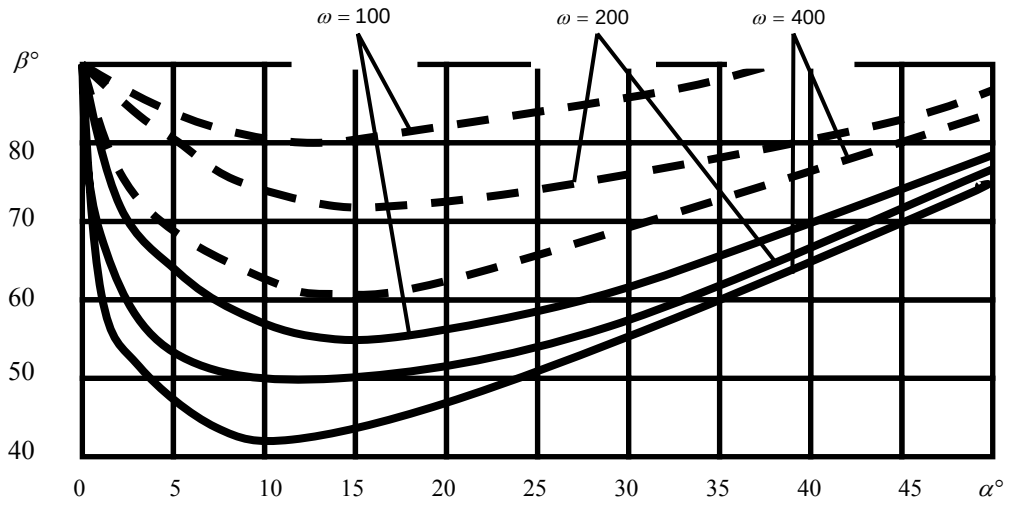

Рис. 4. Зависимости направления движения частицы и потока породы в вертикальном шнеке от угла подъема винтовой линии шнековой лопасти при различных угловых скоростях вращения буровой штанги:

——— - частица породы; - - - - - - поток породы

щей на кромке шнековой лопасти и прижатой к стенке скважины.

На рис. 4 представлены зависимости направления движения частицы и потока породы в вертикальном шнеке от угла подъема винтовой линии шнековой лопасти при различных угловых скоростях вращения буровой штанги. Коэффициенты трения транспортируемой породы о шнек и стенки скважины $f_ш = f_ц = 0,5$. Радиус лопасти шнека $R = 0,5 м$.

Анализ полученных результатов показывает, что все кривые представленные на рисунке 4 имеют экстремум, то есть в каждом случае существует рациональное значение угла подъема винтовой линии шнека, при котором отклонение вектора абсолютной скорости движения частицы или потока породы от продольной оси буровой штанги будет минимальным. При этом значения угла β между направлением вектора абсолютной скорости и продольной осью буровой штанги при прочих равных условиях для частицы и потока породы существенно отличаются.

Установление закономерностей движения потока транспортируемой породы в вертикальном шнеке имеет важное практическое значение, так как позволяет при проектировании буровых ставов более обоснованно выбирать геометрические и кинематические параметры рабочих органов и использовать различные конструктивные решения, обеспечивающие максимальную эффективность функционирования бурового става с учетом свойств транспортируемой породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григорьев А.М.* Винтовые конвейеры.- М.: Машиностроение, 1972. - 218 с.

2. *Евстратова А.В.* Компьютерное моделирование процесса движения потока сыпучего материала в вертикальном винтовом конвейере. Образование, наука, производство: Сб. тез. докл. II Междунар. студенческого форума, г. Белгород, 26-28 мая 2004 г. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004.– Ч.VI – С. 21.

3. *Пискунов Н.С.* Дифференциальное и интегральное исчисление. В 2-х кн. – М.: Наука, 1985. 1008 с.

Коротко об авторах

Евстратова А.В. – Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасский политехнический институт).

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)			
ЗЕМЛЯНОЙ Михаил Александрович	Обоснование технологической схемы добычи минерального сырья во взаимосвязи с производством цемента	25.00.22	к.т.н.
ИГНАТОВ Михаил Викторович	Обоснование интенсивных технологий разработки месторождений с неравномерным оруднением	25.00.22	к.т.н.
НОГАЕВ Алан-Бек Хаджи-Муратович	Обоснование рациональных способов управления состоянием массива при отработке ранее подработанных рудных тел (на примере Талнахского месторождения)	25.00.22	к.т.н.