

А.Б. Капранова, А.В. Ганин, А.Е. Лебедев

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И МОЩНОСТИ ШНЕКОВОГО ПИТАТЕЛЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

(Ярославский государственный технический университет)

e-mail: kap@yars.free.net, ganin.alexey@gmail.com, lae4444@mail.ru

На основе математической модели процесса движения и уплотнения дисперсного материала в горизонтальном шнеке предложен метод оценки производительности и мощности шнекового питателя валкового устройства с учетом физико-механических характеристик деаэрируемой среды и параметров аппарата.

Ключевые слова: дисперсный материал, уплотнение, шнековый питатель, производительность, мощность привода, давление подпора, валковое устройство, порозность, коэффициенты Ламэ

Проектирование оборудования для переработки дисперсных материалов, в том числе смесей разнородных твердых компонентов, остается актуальной проблемой для различных отраслей промышленности. В последнее время происходит расширение области применения валковых устройств не только для процессов переработки полимерных материалов и измельчения комкообразных сыпучих продуктов, но и для деаэрации дисперсных сред. Использование при этом шнекового питателя (рис. 1) для подачи уплотняемого материала в межвалковый зазор [1] позволяет существенным образом сократить размеры валков аппарата, а, следовательно, и энергозатраты.

Производительность шнекового питателя (кг/с) с внешним диаметром D и шагом винта h_w в режиме вертикальной загрузки материала равна

$$Q_1 = \pi h_w n D^2 \rho_T \alpha_{2k} / 240, \quad (1)$$

где ρ_T – истинная плотность вещества среды; α_{2k} – порозность после ее движения и уплотнения в шнеке. Мощность привода данного питателя (кВт), вращающегося с частотой вращения n , складывается из мощностей, расходуемых на транспортирование материала и преодоление сил трения, а также на подпор материала с давлением P_{II} при входе в межвалковый зазор

$$N_1 = Q_1 L f / (367 \eta_w) + \pi h_w n D^2 P_{II} / 240 \quad (2)$$

$$P_{II} = \alpha_{2k} (\lambda + \mu) (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta), \quad (3)$$

где L – длина шнека; η_w – коэффициент полезного действия его привода; λ и μ – коэффициенты Ламэ [4]; ε_r , ε_θ – радиальная и окружная компоненты тензора деформаций твердой фазы.

В частности, значение сеточной функции для порозности дисперсного материала в последнем витке шнека α_{2k} рассчитывается согласно условию сохранения массы в форме связи между порозностью среды в ее выделенном объеме и компонентами тензора деформаций твердого скелета [5]

$$\alpha_2 = \alpha_{20} [(1 - \varepsilon_r)(1 - \varepsilon_\theta)]^{-1} \quad (4)$$

где α_{20} – начальная порозность. Окружные деформации ε_θ материала вычисляются через соответствующие окружные смещения u_θ [6], представляемые в виде решения методом сеток дифференциального уравнения 2-го порядка в частных производных

$$(\lambda + 2\mu) \partial^2 u_\theta / \partial \theta^2 + 2\mu r (r \partial^2 u_\theta / \partial r^2 + 2 \partial u_\theta / \partial r + \varepsilon_r) = 0 \quad (5)$$

с граничными условиями, записанными в пренебрежении трением на поверхности вала шнека диаметром d и учитывающими на внешнем радиусе винта силы трения, вызванные гидростатическим давлением.

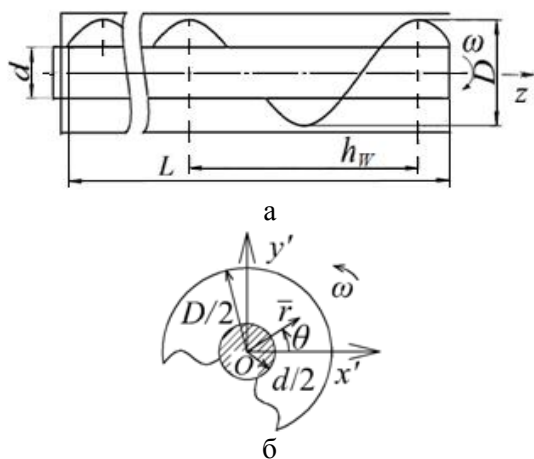


Рис. 1. Схемы движения дисперсной среды в шнековом питателе: а – вдоль оси вращения винта, б – в сечении канала шнека

Fig. 1. The schemes of movement of dispersion medium within screw feeder: a – along the axis of rotation of the screw, б – in the cross section of screw channel

Результаты моделирования процесса движения указанных сред в винтовом канале горизонтального шнека [2, 3] позволяют оценить энергетические характеристики шнекового питателя, предназначенного для принудительной подачи дисперсных материалов в валковом устройстве.

Уравнение (2) получено с помощью системы дифференциальных уравнений в случае плоскодеформационного равновесия дисперсной среды в полярной системе координат с учетом реологических соотношений вида

$$\sigma_r = \alpha_2[(\lambda + 2\mu)\varepsilon_r + \lambda\varepsilon_\theta] \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \alpha_2[(\lambda + 2\mu)\varepsilon_\theta + \lambda\varepsilon_r] \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = 2\mu\gamma_{r\theta} \quad (8)$$

где ε_r , ε_θ , $\gamma_{r\theta}$ – радиальная, окружная и касательная компоненты тензора деформаций твердой фазы. При этом считается, что в (3)-(6) значение радиальных смещений ε_r в соответствии с требованием согласования граничных условий может быть определено с помощью выражения

$$\varepsilon_{r,0} = (\tau_0 + f\rho_T gH)[2\mu(D/d - 1)]^{-1} \quad (9)$$

где τ_0 – связность материала, $f = \operatorname{tg} \varphi_0$ – коэффициент ее внутреннего трения, φ_0 – угол естественного откоса, g – ускорение свободного падения, H – высота слоя в бункере.

Оценка искомых энергетических характеристик Q_1 (рис. 2) и N_1 (рис. 3) проиллюстрирована на примере движения и деаэрации двух текучих дисперсных материалов с характерным пределом изменения степени уплотнения $\eta = (22-28)\%$ (IV класс по методике Керра [5]). В состав рабочих веществ, кроме основных наполнителей (для смеси № 1 – барита (27%), базальтовой ваты (15%); для смеси № 2 – неорганического волокнистого наполнителя (26%), графита (9%)) входят и другие компоненты со связующим веществом. В частности, физико-механические характеристики равны: $\lambda = 8,73 \cdot 10^3$ Па; $\mu = 8,05 \cdot 10^3$ Па; $\rho_T = 8,4 \cdot 10^2$ кг/м³; $\alpha_{20} = 0,5$; $\alpha_{2k} = 0,54$; $\tau_0 = 1,05 \cdot 10^3$ Па; $\varphi_0 = 44^\circ$ для смеси № 1; $\lambda = 1,22 \cdot 10^4$ Па; $\mu = 1,12 \cdot 10^4$ Па; $\rho_T = 9,7 \cdot 10^2$ кг/м³; $\alpha_{20} = 0,51$; $\alpha_{2k} = 0,55$; $\tau_0 = 0,8 \cdot 10^3$ Па; $\varphi_0 = 47^\circ$ для смеси № 2. Кратко остановимся на способах определения основных реологических параметров смесей.

Входящие в выражения (3), (5)-(9) коэффициенты Ламэ λ и μ , которые характеризуют упругие свойства рабочих сред при малых деформациях, определяются с помощью винтового компрессионного прибора [5]. Фиксируемое индикатором давление уплотнения на образец испытываемого материала, помещенного в цилиндр радиусом R , создавалось при повороте маховика нагруженного устройства на π рад. После снятия нагрузки измерялось упругое расширение среды при высоте слоя h . Деформация зернистого скелета ε_2 может быть представлена через значения пористости (начальное α_{10} и в ходе испытаний α_1 , причем $\alpha_{1i} = 1 - m/(\pi R^2 \rho_T h_i)$, $i = 1, N$) с учетом связи между истинными и приведенными плотностями вязкоупругих исследуемых материалов в виде $\varepsilon_2 = (\alpha_1 - \alpha_{10}) / (1 - \alpha_1)$. Вследствие

выполнения обобщенного закона Гука (6) для одноосного сжатия

$$\sigma_2 = (1 - \alpha_1)(\lambda + 2\mu)\varepsilon_2 \quad (10)$$

на участке компрессионной кривой при достаточно небольших изменениях давления: (1,5-5,0) МПа для смеси № 1 и (2,0-5,0) МПа для смеси № 2 зависимость напряжения образца от его пористости $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$ считается линейной. Тогда коэффициенты линейной функции, соответствующей формуле (10), вида $y = ax + b$ для пористости от разности напряжений среды в целом и несущей фазы, где $a = (\lambda + 2\mu)^{-1}$ и $b = \alpha_{10}$ определяются экспериментально с обработкой методом наименьших квадратов [5] при числе опытных точек N .

$$a = \frac{\sum_i y_i x_i - N^{-1} \left(\sum_i x_i \right) \left(\sum_i y_i \right)}{\sum_i y_i^2 - N^{-1} \left(\sum_i y_i \right)^2}, \quad (11)$$

$$b = N^{-1} \left(\sum_i y_i - a \sum_i x_i \right). \quad (12)$$

Полученные таким образом, с относительной ошибкой не более 15%, значения параметра $(\lambda + 2\mu)$, равные $2,50 \cdot 10^4$ Па и $3,44 \cdot 10^4$ Па соответственно для смесей № 1 и № 2, совместно с выражениями $E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + 2\mu)$; $\nu = \lambda/[2(\lambda + \mu)]$ для связи между модулем Юнга E , коэффициентами Пуассона ν и Ламэ λ , μ позволяют рассчитать искомые λ , μ . При этом дополнительно требуется оценка коэффициента бокового давления f_b , определяющего значение коэффициента Пуассона $\nu = f_b/(1 - f_b)$, с помощью известной методики [8]. Согласно [8] указанный параметр f_b имеет смысл коэффициента трения стальной ленты по исследуемой смеси при выдергивании данной ленты из образца, находящегося под нагрузкой, причем значение f_b равно отношению горизонтального и вертикального усилий. Для опытных образцов вязкоупругих смесей № 1 и № 2 установлены значения $f_b = (0,26 \pm 0,06)$.

Конструктивно-режимные параметры шнекового питателя: $H = 1,50 \cdot 10^{-1}$ м; $h_w = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м; $d = 2,0 \cdot 10^{-2}$ м; $D = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м; $L = 3,0 \cdot 10^{-1}$ м с давлением подпора $P_{\text{п}} = 2,0$ МПа. Пределы изменения режимного показателя питателя $n = (20-60)$ мин⁻¹ задаются требуемым значением давления подпора материала в валковый зазор. Согласно полученным результатам (рис. 2) Q_1 выбранного образца шнека нелинейно возрастает с ростом значения режимного параметра устройства. Из графиков 1 и 2 для исследуемых дисперсных смесей видно, что указанные пределы изменения частоты вращения шнека лежат в области изменения значений числа Фруда $\text{Fr} = \pi^2 n^2 D / (60g)$, меньших критического $\text{Fr}_{\text{кр}}$. Известно, что достижение $\text{Fr}_{\text{кр}}$ приводит к резкому уменьшению подачи материала вдоль оси

шнека вследствие возрастания центробежных сил. Анализируя семейство графиков для мощности привода шнека (рис. 3), можно сделать вывод, что в диапазоне изменения $n = (20-60) \text{ мин}^{-1}$ при $n > 30 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается возрастание зависимости $N_1(n)$. Сопоставление результатов теоретико-экспериментальных исследований движения дисперсного материала в шнеке (рис. 2, 3) показывает удовлетворительное согласие расчетных и опытных данных (с ошибкой 11%) [7] и позволяет сделать вывод об интервалах изменения режимного параметра шнека в диапазоне $n = (25-30) \text{ мин}^{-1}$, соответствующем следующим пределам $Fr = (0,61-0,89)$.

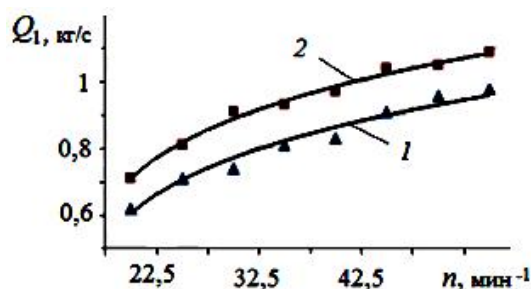


Рис. 2. Зависимость производительности шнекового питателя дисперсных материалов от частоты вращения его вала: 1 – смесь № 1, 2 – смесь № 2; сплошные линии – теория, точки – опытные данные

Fig. 2. The dependence of the productivity of screw feeder of dispersed materials on its shaft rotation frequency: 1 – mixture N 1; 2 – mixture N 2; solid lines – the theory, points – experimental data

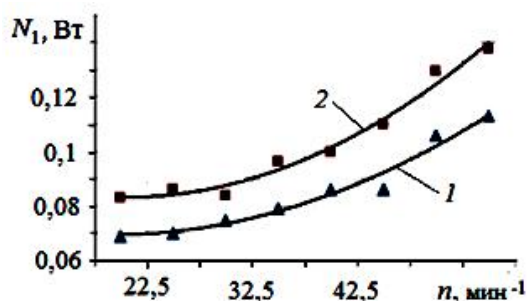


Рис. 3. Зависимость мощности привода питателя дисперсных материалов от частоты вращения вала шнека: 1 – смесь № 1; 2 – смесь № 2; сплошные линии – теория, точки – опытные данные

Fig. 3. The dependence of the drive power of feeder of dispersed materials on the shaft rotation frequency of screw: 1 – mixture N 1; 2 – mixture N 2; solid lines – the theory, points – experimental data

Заметим, что согласно [3, 7] зависимость давления подпора дисперсного материала шнековым питателем от показателя изменения расхода имеет нелинейный характер, близкий к возрастающему экспоненциальному. Проявление вязко-

упругих свойств исследуемого набора смесей приводит к тому, что давление их подпора при одинаковых значениях расхода имеют разброс не более 0,2 МПа. Полученные значения степени уплотнения рабочих веществ в горизонтальном шнеке меняются незначительно: $\eta = (3,6-6,4)\%$ для смеси № 1 и $\eta = (5,8-7,4)\%$ для смеси № 2, что в большей степени характеризует работу винтовой части аппарата, соответствующей режиму питателя. Установлено [3, 7], что использование подпора с давлением порядка (1,0-1,9) МПа изменяет максимальное давление прокатки в (2,0-2,5) раза в сравнении с его значением без принудительной подачи рабочих смесей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части (проект № 626, № государственной регистрации 01201460402).

ЛИТЕРАТУРА

- Капранова А.Б., Дубровин А.В., Зайцев А.И. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 52. Вып. 12. С. 116-118;
Kapranova A.B., Dubrovin A.V., Zaitsev A.I. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2012. V. 52. N 12. P. 116-118 (in Russian).
- Капранова А.Б., Зайцев А.И., Никитина Т.П. // Теор. основы хим. технологии. 2000. Т. 34. Вып. 6. С. 649-656;
Kapranova A.B., Zaitsev A.I., Nikitina T.P. // Teoret. Osnovy Khim. Tekhnologii. 2000. V. 34. N 6. P. 649-656 (in Russian).
- Ганин А.В., Капранова А.Б. // Современ. проблемы науки и образования. 2012. Вып. 6 (Электронный журнал). URL: www.science-education.ru/106-7341;
Ganin A.V., Kapranova A.B. // Sovremennye problem nauki i obrazovaniya. 2012. N 6 (Electronic journal). URL: www.science-education.ru/106-7341 (in Russian).
- Нигматулин Ф.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука. 1978. 336 с.;
Nigmatulin F.I. Fundamentals of heterogeneous mediums mechanic. M.: Nauka. 1978. 336 p. (in Russian).
- Капранова А.Б., Зайцев А.И. Механическое уплотнение тонкодисперсных материалов. М.: Экон-информ. 2011. 247 с.;
Kapranova A.B., Zaitsev A.I. Mechanical densification of fine materials. M.: Ekon-inform. 2011. 247 p. (in Russian).
- Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Гл. изд-во техн.-теор. Литературы. 1954. 276 с.;
Sokolovskiy V.V. Statics of granular media. M.: Gl. Iz-vo tekhn. literatury. 1954. 276 p. (in Russian).
- Капранова А.Б., Ганин А.В., Бакин М.Н. Определение энергетических характеристик шнекового питателя дисперсных материалов // Математич. методы в технике и технологиях - ММТТ-26. Саратов: Изд-во. 2013. С. 40-41;
Kapranova A.B., Ganin A.V., Bakin M.N. Determination of energy parameters of screw feeder of dispersed materials // Mathematical Methods in Technics and Technologies - MMTT-26. Saratov. 2013. P. 40-41 (in Russian).
- Аксенов Г.И. // Тр. ЛПИ. 1969. Вып. 296. С. 35-36;
Aksenov G.I. // Tr. LPI. 1969. N 296. P. 35-36 (in Russian).