

## 2. МЕХАНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 631.22.01

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ СЕМЯН  
В ПНЕВМОТРАНСПОРТЕРЕЮ.М.Исаев, доктор технических наук, А.Н. Ильдутов, кандидат технических наук,  
И.В. Вагин, аспирант

ФГОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия»

В последнее время широкое распространение получили посевные агрегаты с использованием кинетической энергии потока воздуха для транспортирования семян к сошникам. При этом семена приобретают большую скорость движения, что позволяет увеличить дальность отброса. Определим основные зависимости передачи кинетической энергии от потока воздуха к семенам

Введем основные понятия. Производительность  $G_1$  – количество транспортируемого материала в единицу времени. Расход транспортирующего газа  $G_0$ , (кг/ч, кг/с) или объемных  $Q_0$  (м<sup>3</sup>/ч, м<sup>3</sup>/с). Удельный расход

газа  $q$  (м<sup>3</sup>/т) на тонну транспортируемого материала. Расходная массовая концентрация материала  $\mu$  (кг/кг) определяется из выражения  $\mu = G_1 / G_0$ . Масса материала в единице длины транспортного трубопровода  $q_i$  (кг/м) – смысл массовой линейной скорости в трубопроводе  $q_1 = G_1 / v$ .

Масса газа в единице длины транспортного трубопровода  $q_a$  (кг/м) -смысл массовой линейной скорости газа  $q_2 = G_2 / u$ .

Истинная массовая концентрация смеси в трубопроводе  $\mu_a$  (кг/кг):

$$\mu_a = q_1 / q_0 = G_1 / G_0 (u / v) = \mu (u / v)$$

Последнее выражение показывает, что истинная концентрация всегда больше расходной из-за наличия трения материала о стенки

трубопровода. Кроме того, в местах, где материал имеет пониженную скорость, происходит локальное увеличение концентрации, повышается вероятность образования пробки.

Наконец масса материала в единице объема трубопровода (кг/м<sup>3</sup>) - смысл плотности смеси в движении:

$$\rho_0 = q_1 / S = dG_1 / Sdx = G_1 / Sv = \mu (u / v) \rho_1$$

При движении частицы шаровой формы в спокойной газовой среде действуют следующие силы:

сила тяжести:

$$P = \frac{\pi d^3}{6} \rho_1 g$$

сила Архимеда:

$$F_a = \frac{\pi d^3}{6} \rho_0 g$$

сила аэродинамического сопротивления частицы, определяемая по формуле Ньютона:

$$R = \frac{\lambda S_0 v^2}{2} \rho_0$$

Величина подъемной силы (Архимеда) в газовой среде пропорциональна соотношению плотностей, влиянием этой силы для практических расчетов можно пренебречь. При установившемся движении  $P = R$ , откуда:

$$v = \sqrt{\frac{4 \rho_1 g d}{3 \lambda \rho_0}}$$

При встречном потоке газа, когда скорость частицы равна нулю, справедливо усло-

вие  $v = u$  и, следовательно,  $P = R$  или

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_1 g = \lambda \frac{\pi d^3}{4} \frac{v^2}{2} \rho_0$$

из которого

$$v_e = \sqrt{\frac{4\rho_1 g d}{3\lambda\rho_0}}$$

Коэффициент сопротивления зависит от критерия Re и формы частиц:

$Re \leq 1$ ;  $\lambda = 24/Re$  – закон Стокса, в

диапазоне  $Re = 1 \dots 500$ ;

$\lambda = 24/Re(1 + 0,158Re^{2/3})$  – переход-

ная область  $Re = 500 \dots 10^5$ ;

$\lambda \approx 0,44$  – закон Ньютона – автомо-

дельная область для частиц  $d > 10^3$  м.

Итак, в вертикальном или горизонтальном потоках сила аэродинамического воздействия газа на частицу зависит от относительной скорости обтекания и определяется из выражения:

$$R = \frac{\lambda S_0 (u - v)^2}{2} \rho_0$$

При пневматической транспортировке твердых частиц различают два вида потока:

а) с равномерным распределением частиц;

б) при расслаивании смеси материала с воздухом.

При установившемся режиме с равномерным распределением частиц по сечению несущая сила потока газа должна компенсировать силы, препятствующие движению.

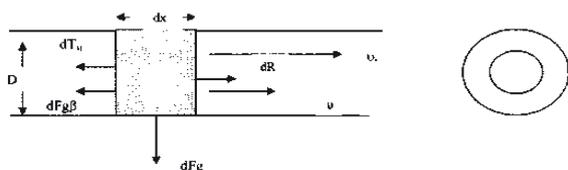


Рис.1. Силы, действующие на материал в трубопроводе.

В сторону движения материала действует сила, передаваемая от газового потока скоплению материала  $dR$ , в противоположную сторону действует сила сопротивления  $dT$ , обусловленная соударениями частиц о стенки, и сила трения, обусловленная весом материала (рис.1). В установившемся режиме справедливо уравнение:

$$dR - dT - dF_g \beta$$

Для силы  $dT$  касательное напряжение между стенкой трубы и потоком материала с равномерным распределением частиц по сечению трубопровода принимается пропорциональным силе инерции масс частиц, аналогично зависимости при течении чистого газа:

$$\gamma = \frac{\lambda_e v \rho_1}{8}$$

где  $\lambda_e$  – коэффициент сопротивления,

зависящий от свойств транспортируемого материала и стенки трубы:

$$dT = \gamma \pi D dx = \pi D \left( \frac{\lambda_e v \rho_1}{8} \right) dx = \frac{G_m}{Sv} = \frac{\lambda_e v^2 dG_m}{2D}$$

$$\beta = \sin \alpha + f \cos \alpha$$

где  $\alpha$  – угол наклона трубопровода;  $f$  –

коэффициент трения скольжения материала по трубе. Для вертикальных трубопроводов – 1, для горизонтальных –  $f$ .

Подставим в уравнение баланса сил его составляющие и после соответствующих преобразований получим:

$$(u - v)^2 - \frac{\lambda_e}{2gD} (vv_e)^2 - \beta v_e^2 = 0$$

Это уравнение пригодно для определения скорости газа при известной скорости материала, график изменения скорости материала в зависимости от скорости газа приведен на рисунке 2.

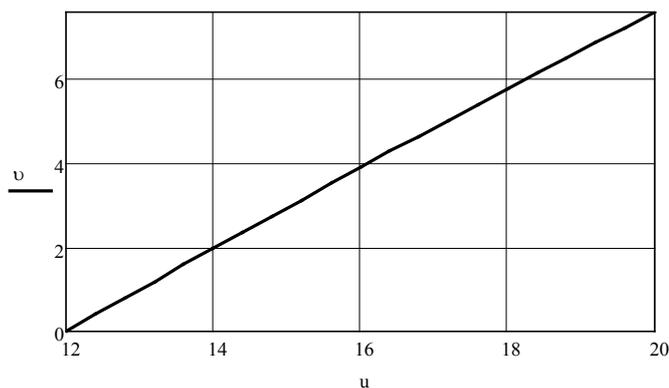


Рис.2. График изменения скорости материала в зависимости от скорости газа.

Для получения зависимости отношения скоростей  $\varepsilon = v/u$  от скорости потока газа составим уравнение относительно  $\varepsilon$ :

$$(1 - \varepsilon)^2 - \frac{\lambda_0}{2gD} (\varepsilon v_0)^2 - \beta (v_0/u)^2 = 0$$

Из которого можно определить  $\varepsilon(u)$ , график изменения  $\varepsilon$  в зависимости от скорости газа приведен на рисунке 3.

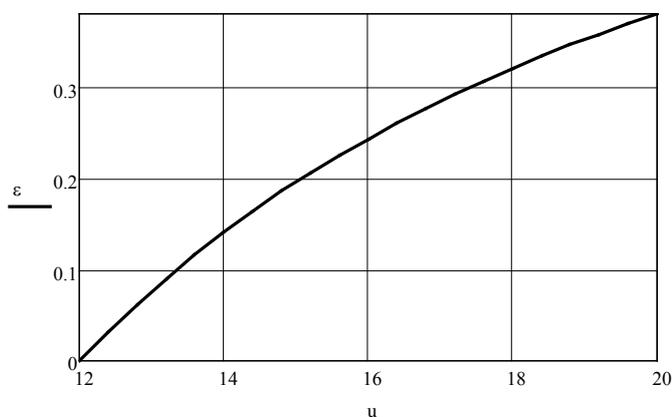


Рис.3. График изменения отношения скоростей  $\varepsilon = v/u$  в зависимости от скорости газа.

Суммарное падение сопротивления при установившемся движении смеси газа с материалом может быть представлено в конечном счете:

$$\Delta P = \Delta P_0 \left( 1 + \frac{\lambda_0 G_m}{\lambda_1 G_2} \right)$$

где 
$$\lambda_0 = \lambda_0' \frac{v}{u} + \frac{2\beta g D}{vu}$$

Из последнего уравнения следует, что коэффициент сопротивления  $\lambda_0$  растет с уве-

личением трения скольжения материала и с увеличением диаметра трубопровода. Он же уменьшается с увеличением скорости газа и с уменьшением скорости витания частиц материала, так как при этом увеличивается отношение  $v/u$ .

Если последние уравнения разрешить относительно  $G_1$  при постоянстве соотношения скоростей и материала по длине трубопровода, получим:

$$G_1 = \frac{\Delta P - AG^2}{BG + (C/G)},$$

где 
$$A = \frac{8\lambda L}{\pi^2 D^5 \rho_0}$$

$$B = \frac{8\lambda L}{\pi^2 D^5 \rho_0} (v/u)$$

$$C = g\beta L \rho_0 (v/u)$$

Это же уравнение, разрешенное относительно  $\Delta P$ , может быть представлено как:

$$\Delta P = AG_0^2 + BG_0 G_1 + C \frac{G_1}{G_0}$$

Вид полученных уравнений при их графической интерпретации представлен на рис.4, 5.

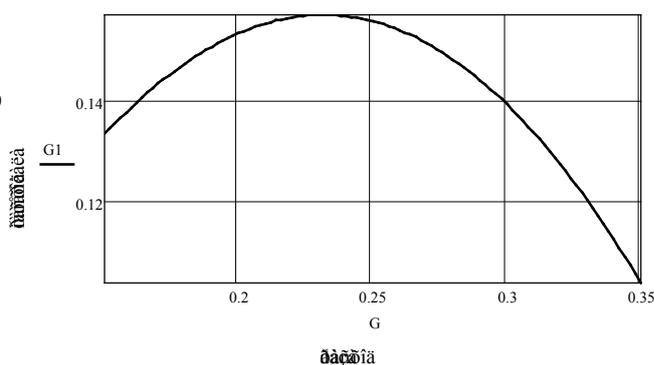


Рис. 4. Зависимость производительности от расхода газа при постоянном давлении в транспортном трубопроводе.

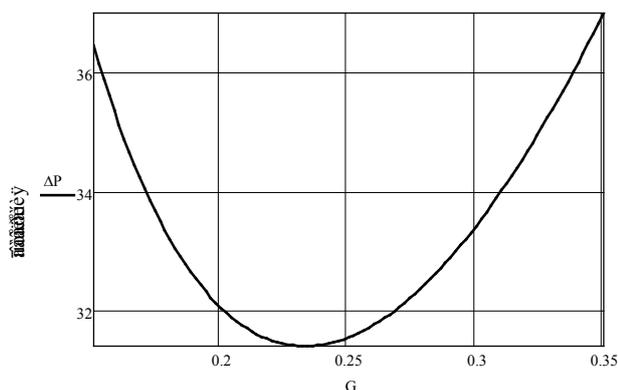


Рис. 5. График изменения потери давления в зависимости от скорости газа для массового расхода материала  $G_m = 0,16$  кг/с.

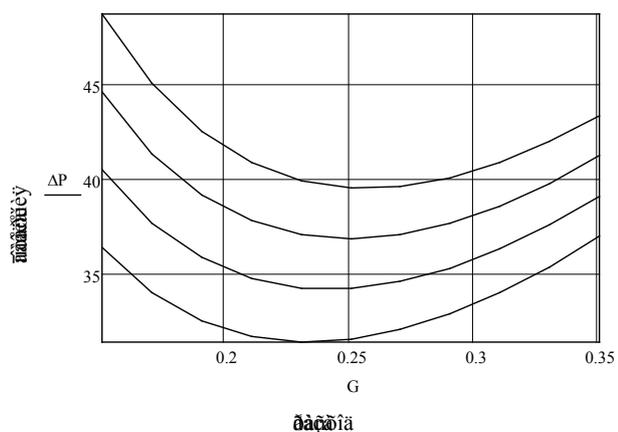
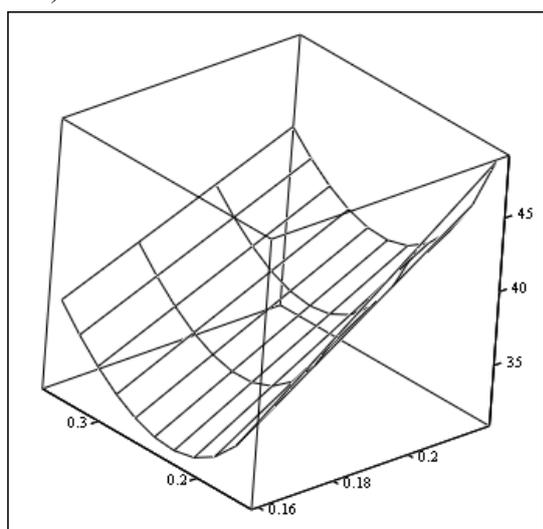


Рис. 6. График изменения потери давления в зависимости от скорости газа для массового расхода материала  $G_m$  от 0,16 кг/с (нижняя кривая) до 0,22 кг/с (верхняя кривая).



( $G_1, G, \Delta P$ )

Рис. 7. Поверхность отклика потери давления в зависимости от массового расхода газа и массового расхода материала.

Область рабочих режимов пневмотранспорта расположена в сторону больших значений расхода транспортного газа. Точка перегиба соответствует минимуму затрат. Область меньших – режим транспорта с расслоением смеси.

Задачей расчета является определение  $\Delta P_{min}$  и соответствующего ему оптимального расхода газа  $G_{opt}$  для заданного значения производительности по материалу  $G_1$ .

Продифференцируем выражение для  $\Delta P$  по  $G$  и приравняем к нулю:

$$\frac{1}{G_0^2} = \frac{2A}{C} \frac{G_0}{G_1} + \frac{B}{C}$$

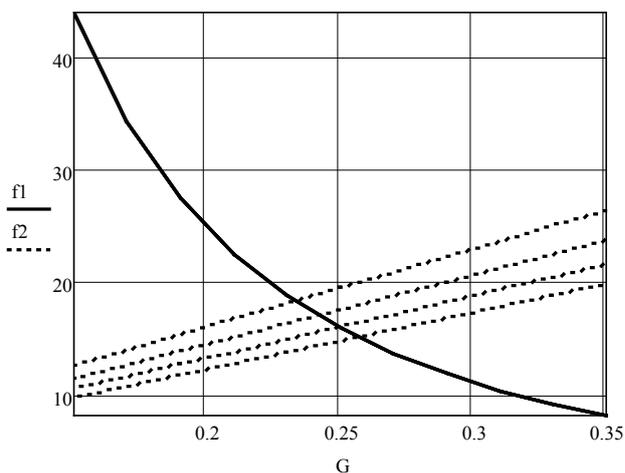


Рис. 8. Графическое решение уравнения для определения оптимального расхода газа для массового расхода материала  $G_m$  от 0,16 кг/с (нижняя кривая) до 0,22 кг/с (верхняя кривая).

Представленное уравнение может быть решено графически. На рис. 8 показано решение уравнения в общем виде. Точка пересечения графиков двух функций  $f_1 = \frac{1}{G_0^2}$  и  $f_2 = \frac{2A}{C} \frac{G_0}{G_1} + \frac{B}{C}$  дает значение  $G_{opt}$ , которое может быть использовано для определения минимальных потерь давления и выбора насосных агрегатов.