

УДК 631.374:636.085

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВХОДЕ В БУНКЕР ИЗ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА С ВЫХОДНЫМ КЛАПАНОМ

*В.П. Чиркин, А.М. Гальмак*

Для нового способа пневматической загрузки бункеров сыпучим материалом, значительно сокращающим время загрузки и повышающим ее производительность, теоретически получена формула для определения скорости частиц сыпучего материала на входе в бункер при его загрузке снизу с помощью распределительного телескопического трубопровода, снабженного клапаном-рассекателем на выходе. При выводе формулы аэродинамическая сила и взаимодействие частиц не учитывались, так как рассматриваемый режим загрузки осуществляется при малых значениях относительных скоростей несущей среды и материала и небольших концентрациях смеси. Предполагается также, что торможение частиц происходит только за счет силы трения, возникающей при скольжении их по поверхности клапана

### Введение

В настоящее время бункерные хранилища загружаются сыпучим материалом с помощью механического или пневматического транспорта. В известном способе пневматической загрузки бункеров [рис.1(а)] сыпучий материал транспортируется по вертикальному трубопроводу, выделяется в разгрузителе и загружается в бункер [1, 2]. Недостатком такого способа загрузки является то, что материал независимо от его количества в бункере необходимо постоянно поднимать на высоту бункера и разгрузителя, что приводит к снижению производительности загрузки и, как следствие, к увеличению энергозатрат.

В [3, 4] авторами предложен новый способ пневматической загрузки бункеров сыпучим материалом, при котором сокращение времени загрузки, а также повышение производительности происходит за счет уменьшения потерь давления аэросмеси. Устройство для осуществления этого способа, представленное на рис.1(б), содержит клапан-рассекатель на выходе распределительного телескопического трубопровода. Цель работы – описание плоского движения частиц по поверхности клапана-рассекателя.

### Описание нового устройства загрузки бункеров и движения частиц по клапану-рассекателю

Устройство содержит источник сжатого воздуха в виде вентилятора 1 высокого давления, емкость 2, питатель 3, загрузочный транспортный трубопровод 4, распределительный телескопический трубопровод 5 с клапаном 6 и лебедкой 7, подвижный датчик уровня 8, бункер 9, выпускной патрубком 10 с затвором 11.

Распределительный телескопический трубопровод 5 состоит из входящих друг в друга нижнего 12, промежуточных 13 и верхнего 14 патрубков, при этом нижний патрубок 12 меньшего диаметра соединен с загрузочным транспортным трубопроводом 4, а последний верхний патрубок 14 с помощью стержней 15 с клапаном 6 и лебедкой 7. В верхней части бункера 9 расположен кнопочный выключатель 16.

Устройство работает следующим образом.

Сыпучий материал, например пшеница, поступает в приемный бункер 2. Из приемного бункера 2 пшеница направляется в питатель 3 и с помощью сжатого воздуха, поступающего от вентилятора 1, подается в загрузочный транспортный трубопровод 4, а затем в распределительный телескопический трубопровод 5, который в начальный период загрузки находится в собранном виде. Сыпучий материал, пройдя телескопический воздухопровод 5, высыпается в бункер 9 через отверстия между патрубком 14 и клапаном 6. При заполнении приемной емкости 9 материалом выше подвижного датчика уровня 8 происходит включение цепи управления приводом вертикального перемещения клапана 6 и

телескопического трубопровода 5, в результате чего электродвигатель лебедки поднимает клапан 7 и патрубки 12, 13 и 14 телескопического трубопровода 5 выше. Процесс повторяется до полной загрузки бункера 9. В верхнем положении клапан нажимает на конечный кнопочный выключатель 16, который отключает электродвигатель лебедки 7. После выгрузки сыпучего материала из бункера 9 включается электродвигатель лебедки 7 на реверс, и клапан 6 с патрубками телескопического трубопровода 5 под действием собственного веса возвращаются в исходное положение.

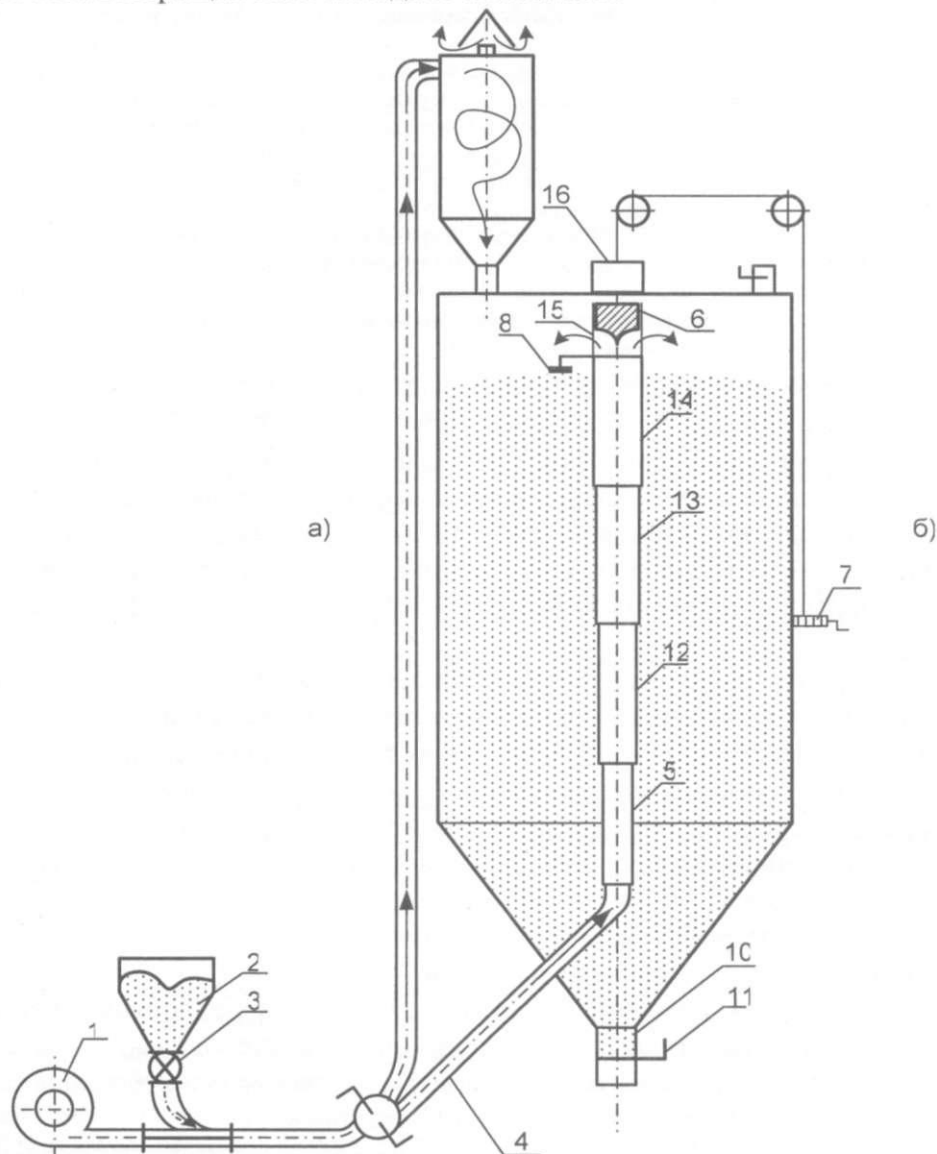


Рисунок 1 - Устройство для пневматической загрузки бункера сыпучими материалами:  
 а - известный способ загрузки бункеров; б - новый способ загрузки бункеров.

Как показали проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования [3], время загрузки бункера любой высоты снизу с помощью распределительного телескопического материалопровода почти в два раза меньше времени загрузки этого же бункера традиционным способом сверху. При этом производительность загрузки бункера увеличивается.

При загрузке бункера пневмотранспортными установками (см. рис. 1) необходимо регулировать подачу материала из емкости 2 через шлюзовый затвор 3 в пневмотранспортную сеть. В начальный период загрузки подача материала должна быть максимальной, а в конце загрузки – минимальной. Это можно осуществить путем регулирования частоты вращения ротора шлюзового затвора.

При загрузке бункера пневмотранспортными установками нагнетающего типа и аэрозольтранспортными установками происходит саморегулирование загрузки бункера. В начальный период загрузки в “сопло” всасывающе-нагнетающей установки при минимальной высоте телескопического материалопровода, ввиду малого сопротивления пневмотранспортной сети, будет поступать большее количество материала, чем в конечный период загрузки при наибольшей высоте телескопического материалопровода.

Загрузка бункерных хранилищ материалом может осуществляться в различных режимах, определяемых параметрами потока. Основными из них являются: скорость несущей среды  $v$ , соотношение твердого и газообразного компонента в потоке (концентрация  $\mu$ ) и величина избыточного давления  $H$ .

В зависимости от значения этих параметров загрузку бункера материалом можно осуществлять в двух режимах: с низкими концентрациями ( $\mu = 2 - 10 \text{ кг/кг}$  и ниже) и высокими концентрациями ( $\mu = 100 - 150 \text{ кг/кг}$  и выше) – сплошные потоки [5].

При загрузке бункера пневмотранспортными установками с высокой концентрацией аэросмеси (аэрозольтранспортными установками) значительно упрощается конструкция механизма загрузки. В этом случае последний верхний патрубок распределительного телескопического трубопровода присоединяют с помощью стержней непосредственно к механизму подъема трубопровода. Упрощение конструкции становится возможным ввиду малых скоростей несущей среды ( $v = 4 - 7 \text{ м/с}$ ). Загрузка сыпучего материала в бункер с помощью такой конструкции может осуществляться без клапана-рассекателя, так как скорость материала на выходе из верхнего патрубка телескопического трубопровода будет незначительной и в действительности материал из этого патрубка будет вываливаться в бункер.

Современные пневмотранспортные установки нагнетающего типа и пневмоперегрузатели всасывающе-нагнетательного типа в основном работают при низких концентрациях с высокими скоростями несущей среды ( $v = 20 - 25 \text{ м/с}$  и более). Загрузку бункера в этом случае необходимо осуществлять с использованием клапана-рассекателя, что позволит снизить удельный расход несущей среды, интенсифицировать процесс отвода материала за пределы телескопического трубопровода и уменьшить потребление электроэнергии.

Так как концентрация смеси при таком режиме загрузки небольшая, то взаимодействием частиц практически можно пренебречь.

Для снижения крошимости материала необходимо подобрать такую скорость частиц  $U_0$ , чтобы величина конечной скорости частицы  $U_k$  при выходе из клапана принимала минимально допустимое значение.

С этой целью рассмотрим изменение скорости твердых частиц в зависимости от угла и направления потока частиц в зоне клапана. Транспортируемые частицы материала, достигшие за некоторое время поверхности клапана, начинают скользить по ней и в результате действия силы трения затормаживаются.

Определим величину снижения скорости частицы при ее движении по поверхности рассекателя (рис. 2) для случая, когда скольжение частицы начинается сразу, так как в момент соприкосновения с клапаном-рассекателем в области его оси отсутствует удар.

При движении потока по рассекателю принимаем следующие допущения:

- 1) характер торможения определяет сила трения  $T$ , действующая на частицу;
- 2) ввиду малых значений относительных скоростей несущей среды и материала аэродинамическая сила не учитывается.

Из этих допущений следует, что на частицу будут действовать силы тяжести  $G$ , реакция поверхности клапана-рассекателя  $N$  и сила трения  $T$ .

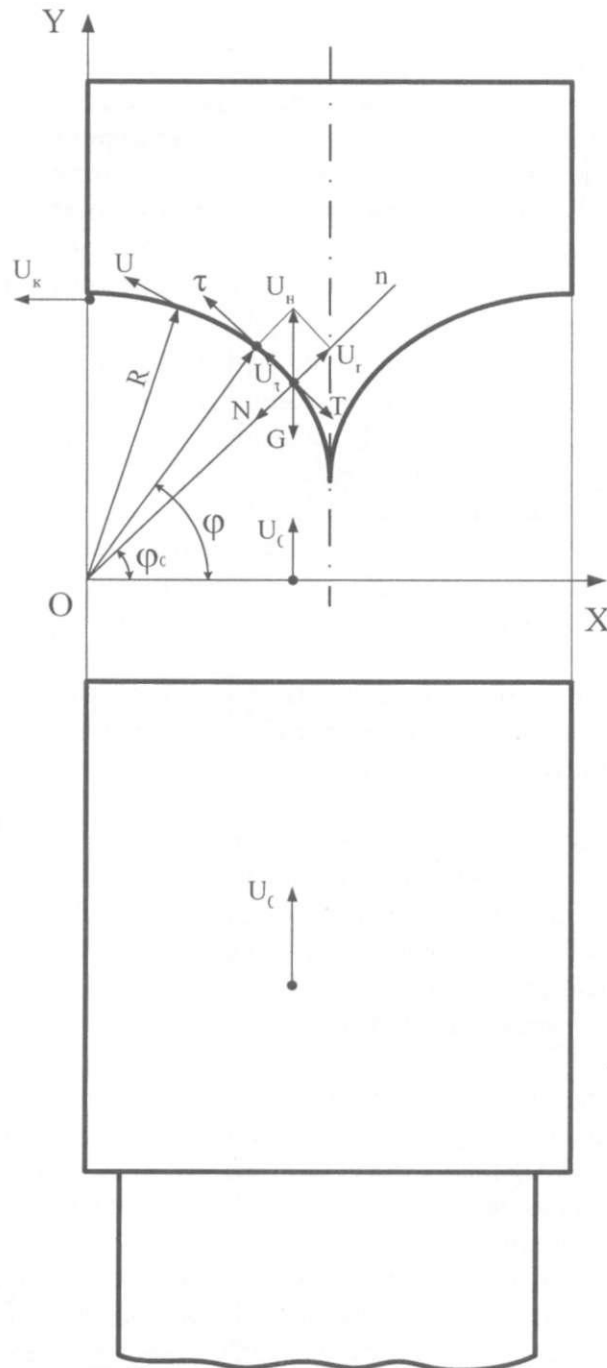


Рисунок 2 - Схема сил, действующих на частицу при ее движении по клапану

Вспользуемся уравнением движения материальной точки в прямоугольных координатах [5].

Для случая плоского движения частицы по поверхности клапана-рассекателя круглого профиля запишем следующие дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= T \sin \varphi - N \cos \varphi, \\ m \frac{d^2y}{dt^2} &= -T \cos \varphi - N \sin \varphi - G, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – текущее значение угла поворота.

Далее запишем дифференциальные уравнения движения материальной точки в естественной форме:

$$m \frac{dU}{dt} = T \sin \varphi,$$

$$m \frac{U^2}{R} = -F \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $F$  – равнодействующая сила.

Разложив равнодействующую силу на составляющие, получим:

$$m \frac{dU}{dt} = -T - G \sin \varphi, \quad (3)$$

$$m \frac{U^2}{R} = N + G \cos \varphi, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус поверхности клапана-рассекателя, по которой скользит частица.

Реакцию поверхности найдем из уравнения (4):

$$N = m \frac{U^2}{R} - G \cos \varphi. \quad (5)$$

Сила трения  $T$  определяется следующим образом:

$$T = Nf, \quad (6)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Подставляя (5) в (6), получим

$$T = \left( m \frac{U^2}{R} - G \cos \varphi \right) f, \quad (7)$$

а подставляя (7) в (3), имеем

$$m \frac{dU}{dt} = -m \frac{U^2}{R} f + G f \cos \varphi - G \sin \varphi.$$

Так как  $G = mg$ , где  $m$  – масса,  $g$  – ускорение свободного падения, то из последнего уравнения имеем

$$m \frac{dU}{dt} = -m \frac{U^2}{R} f + mg f \cos \varphi - mg \sin \varphi,$$

откуда

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U^2}{R} f + g f \cos \varphi - g \sin \varphi. \quad (8)$$

Заметим, что  $\frac{1}{R} = \frac{d\varphi}{dt} \frac{1}{U}$ , откуда  $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U}{R}$  или

$$dt = \frac{R}{U} d\varphi. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получаем

$$\frac{U}{R} \frac{dU}{d\varphi} = -\frac{U^2}{R} f + g(f \cos \varphi - \sin \varphi),$$

откуда

$$U \frac{dU}{d\varphi} = -U^2 f + gR(f \cos \varphi - \sin \varphi).$$

Для новой переменной  $z = U^2$  имеем  $dz = 2UdU$  или  $UdU = \frac{dz}{2}$ , откуда

$$\frac{dz}{2d\varphi} = -zf + gR(f \cos \varphi - \sin \varphi)$$

и получаем линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dz}{d\varphi} + 2zf = 2gR(f \cos \varphi - \sin \varphi). \quad (10)$$

с начальным условием

$$Z(0) = U_0^2. \quad (11)$$

Так как общее решение линейного дифференциального уравнения первого порядка

$$\frac{dz}{d\varphi} + p(\varphi)z = q(\varphi)$$

имеет вид

$$z(\varphi) = u(\varphi) \left( \int \frac{q(\varphi)}{u(\varphi)} d\varphi + C \right), \quad (12)$$

где

$$u(\varphi) = e^{-\int p(\varphi) d\varphi},$$

то общее решение дифференциального уравнения (10) имеет вид (12) при

$$p(\varphi) = 2f, \quad q(\varphi) = 2gR(f \cos \varphi - \sin \varphi).$$

Найдем  $u(\varphi)$ :

$$u(\varphi) = e^{-\int 2f d\varphi} = e^{-2f\varphi},$$

т.е.

$$u(\varphi) = e^{-2f\varphi}. \quad (13)$$

Далее

$$\begin{aligned} \int \frac{q(\varphi)}{u(\varphi)} d\varphi &= \int \frac{2gR(f \cos \varphi - \sin \varphi)}{e^{-2f\varphi}} d\varphi = \int e^{2f\varphi} 2gR(f \cos \varphi - \sin \varphi) d\varphi = \\ &= 2gR \left( f \int e^{2f\varphi} \cos \varphi d\varphi - \int e^{2f\varphi} \sin \varphi d\varphi \right), \end{aligned}$$

откуда, учитывая

$$\int e^{ax} \sin x dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + 1} (a \sin x - \cos x),$$

$$\int e^{ax} \cos x dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + 1} (a \cos x + \sin x),$$

будем иметь

$$\int \frac{q(\varphi)}{u(\varphi)} d\varphi = 2gR \left( f \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} (2f \cos\varphi + \sin\varphi) - \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} (2f \sin\varphi - \cos\varphi) \right) =$$

$$= 2gR \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} (f(2f \cos\varphi + \sin\varphi) - (2f \sin\varphi - \cos\varphi)) = 2gR \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi),$$

т.е.

$$\int \frac{q(\varphi)}{u(\varphi)} d\varphi = 2gR \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi). \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (12) получаем общее решение дифференциального уравнения (10)

$$z(\varphi) = e^{-2f\varphi} \left( 2gR \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi) + C \right). \quad (15)$$

Подставим в общее решение (15) начальное условие (11)

$$U_0^2 = e^{-2f \cdot 0} \left( 2gR \frac{e^{2f \cdot 0}}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos 0 - f \sin 0) + C \right) = \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} + C,$$

откуда

$$C = U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1}.$$

Таким образом, частное решение дифференциального уравнения (10), удовлетворяющее начальному условию (11), имеет вид

$$z(\varphi) = e^{-2f\varphi} \left( 2gR \frac{e^{2f\varphi}}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi) + U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} \right)$$

или

$$z(\varphi) = e^{-2f\varphi} \left( U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} + \frac{2gR}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi) \right). \quad (16)$$

Из (16), учитывая замену  $z(\varphi) = U^2(\varphi)$ , получаем

$$U^2(\varphi) = e^{-2f\varphi} \left( U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} + \frac{2gR}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi) \right),$$

откуда

$$U(\varphi) = e^{-f\varphi} \left( U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} + \frac{2gR}{4f^2 + 1} ((2f^2 + 1) \cos\varphi - f \sin\varphi) \right)^{0.5}. \quad (17)$$

### Заключение

Полученная формула (17) при выбранных начальных условиях  $\varphi = 0$ ,  $U = U_0$  позволяет описать скорость плоского движения частицы по поверхности клапана-рассекателя от оси телескопического трубопровода до ее входа в бункер.

Для устойчивости процесса загрузки материала в бункер необходимо, чтобы скорость материала на выходе из клапана-рассекателя удовлетворяла неравенству

$$U_k \geq 0. \quad (18)$$

Если известна величина конечной скорости частицы  $U_k$ , то можно определить необходимую начальную скорость  $U_0$ , удовлетворяющую условию (18).

При повороте потока на угол  $\varphi = 90^\circ$  величина конечной скорости частицы определяется выражением

$$U^2\left(\frac{\pi}{2}\right) = U_k^2 = e^{-f\pi} \left( U_0^2 - \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1} - \frac{2gRf}{4f^2 + 1} \right),$$

откуда

$$U_0^2 = e^{f\pi} U_k^2 + \frac{2gRf}{4f^2 + 1} + \frac{2gR(2f^2 + 1)}{4f^2 + 1}. \quad (19)$$

Из формулы (19) видно, что наименьшее значение  $U_0$  достигается при  $U_k = 0$ , т.е. наиболее целесообразным является режим транспортирования при  $U_k = 0$ .

### Литература

1. Володин, Н.П. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам / Н.П. Володин. – М.: Колос, 1984. – 182 с.
2. Зуев, Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф.Г. Зуев. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
3. Чиркин В.П., Гальмак А.М. О быстрой загрузке бункеров //Транспортные и строительные машины: Вестник Могилевского госуд. техн. ун-та. -2003. -№2. – С. 162-165.
4. Устройство для пневматического транспортирования материалов: пат. 7586 Респ. Беларусь, МПК7 В65 G53/00. / В.П. Чиркин, А.М. Гальмак; заявитель Мог. гос. ун-т. прод. – № а 20021014; заявл. 13.12.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 1. – С. 58 – 59.
5. Кильчевский, Н.Н. Курс теоретической механики / Н.Н. Кильчевский. – М.: Наука, - 1972. – 452 с.

*Поступила в редакцию 13.04.2006*