

УДК 631.374:636.085

## ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ЗАГРУЗКА БУНКЕРОВ СЫПУЧИМ МАТЕРИАЛОМ

*В.П. Чиркин, Л.Ф. Котягов, С.В. Богуслов*

Рассмотрены и проанализированы различные схемы пневматической загрузки бункеров сыпучим материалом с использованием распределительного телескопического трубопровода, размещенного внутри бункера. Предложена формула для определения производительности загрузки в начальный период. Изучены зависимости производительности загрузки от высоты подъема материала и частоты вращения ротора шлюзового затвора от времени загрузки. Предложена электрическая схема для регулирования производительности загрузки путем изменения частоты вращения ротора шлюзового затвора.

### **Введение**

В настоящее время бункерные хранилища загружаются сыпучим материалом с помощью механического или пневматического транспорта. Анализ известных способов пневматической загрузки бункеров показал, что сыпучий материал перед загрузкой транспортируется по вертикальному материалопроводу, выделяется в отделителе и затем загружается в бункер [1–2]. Недостатком известных способов загрузки является то, что материал, независимо от его количества в бункере, необходимо постоянно поднимать на высоту бункера и отделителя, что приводит к снижению производительности загрузки и, как следствие, к увеличению энергозатрат.

Нами предложен [3–4] новый способ пневматической загрузки бункеров сыпучим материалом, при котором сокращается время загрузки, а также повышается производительность за счет уменьшения потерь давления аэросмеси. Устройство для осуществления этого способа содержит клапан-рассекатель на выходе распределительного телескопического трубопровода. В работе изложен метод регулировки производительности загрузки в зависимости от высоты подъема материала.

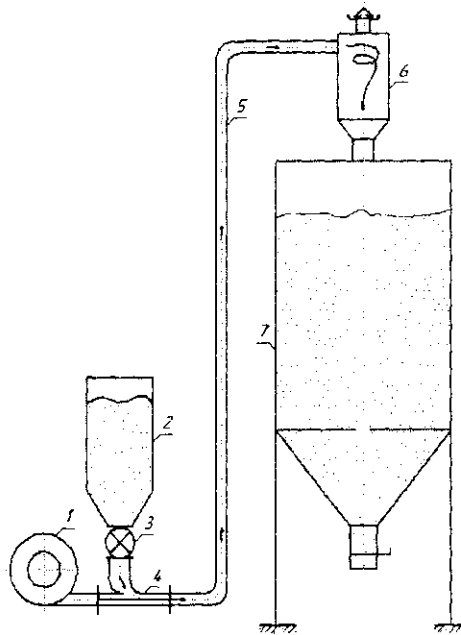
### **Результаты исследований и их обсуждение**

На рисунке 1 приведена схема загрузки бункера известным способом [1–2]. Сыпучий материал транспортируется по вертикальному материалопроводу 5, выделяется в отделителе 6 и загружается в бункер 7.

С целью снижения времени загрузки, повышения производительности путем уменьшения потерь давления аэросмеси нами предложен новый способ пневматической загрузки бункеров сыпучим материалом с использованием распределительного телескопического трубопровода, размещенного внутри бункера [4].

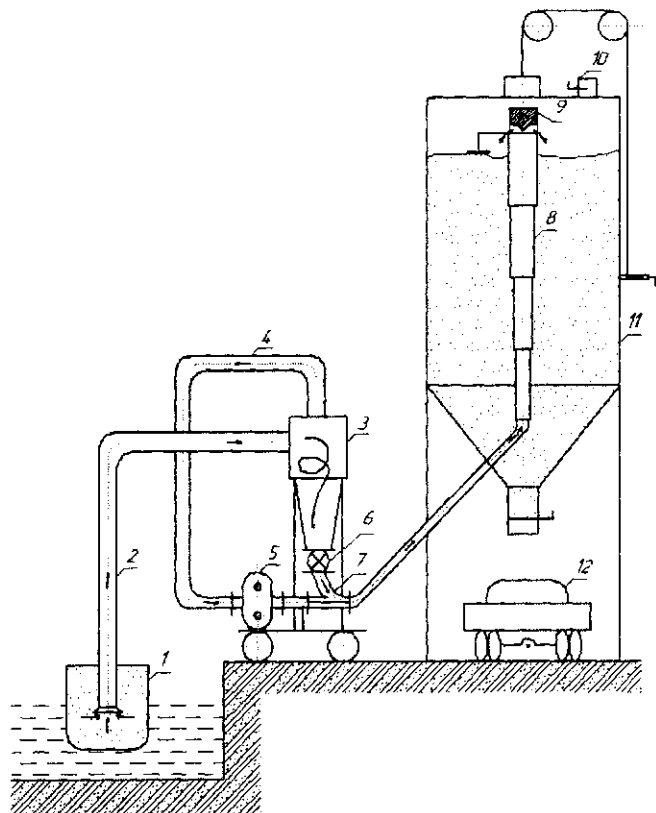
При выгрузке сыпучего материала из барж с помощью пневмоперегрузателей всасывающе-нагнетательного принципа действия происходит саморегулирование производительности загрузки материала в бункер, т.е. в начале загрузки бункера, когда телескопический трубопровод находится в собранном виде, из-за уменьшения высоты подъема материала производительность загрузки бункера увеличивается, затем, по мере подъема телескопического трубопровода, производительность загрузки снижается (рисунок 2).

Устройство работает следующим образом. При включенной воздуходувной машине 5 пневмоперегрузателя сыпучий материал, например, пшеница из баржи 1 по материалопроводу 2 поступает в отделитель 3, выделяется в нем и шлюзовым затвором 6 подается в приемник типа «тройник» 7. Из «тройника» 7 материал вместе с воздухом движется по телескопическому трубопроводу 8, клапану 9 и загружается в бункер 11. Отработанный воздух выводится через патрубок 10 при открытой задвижке. В данном случае бункер 11 выполняет функцию объемного и инерционного отделителя.



1—вентилятор; 2—емкость; 3—шлюзовый затвор; 4—приемник типа «тройник»;  
5—материалопровод; 6—отделитель; 7—бункер

**Рисунок 1 – Схема загрузки бункера традиционным способом**



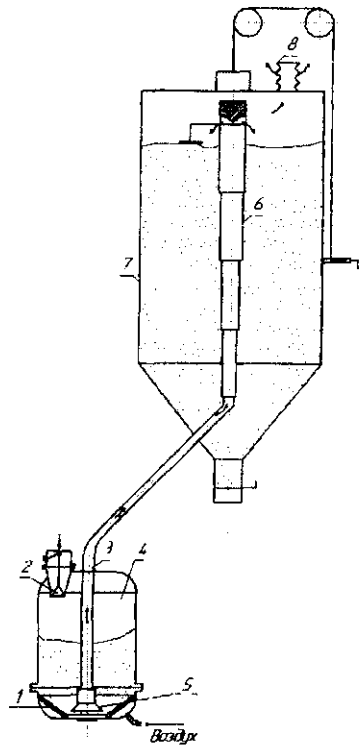
1—баржа с сыпучим материалом; 2—материалопроводы; 3—отделитель материала;  
4—воздуховоды; 5—воздуходувная машина; 6—шлюзовый затвор; 7—приемник типа «тройник»;  
8—телескопический трубопровод; 9—клапан с лебедкой; 10—патрубок с задвижкой для отработанного воздуха;  
11—бункер для сыпучего материала; 12—автотранспорт

**Рисунок 2 – Схема загрузки бункера с помощью пневмоперегрузателей всасывающе-нагнетательного принципа действия**

В начальный период загрузки бункера 11 сыпучим материалом цилиндрические пат-

рубки телескопического трубопровода 8 собраны. В этот период высота распределительного телескопического трубопровода минимальна, что приводит к снижению в нем потерь давления аэросмеси (потери давления на подъем материала, потери давления на трение воздуха и материала о стенки патрубков телескопического трубопровода и т. д.) и к увеличению производительности загрузки. Процесс повторяется до полной загрузки бункера 11. В этот период высота телескопического трубопровода максимальна, т.к. его патрубки полностью выдвинуты и потери давления аэросмеси в распределительном телескопическом трубопроводе 5 повышаются до максимального значения, а производительность загрузки уменьшается до минимального значения.

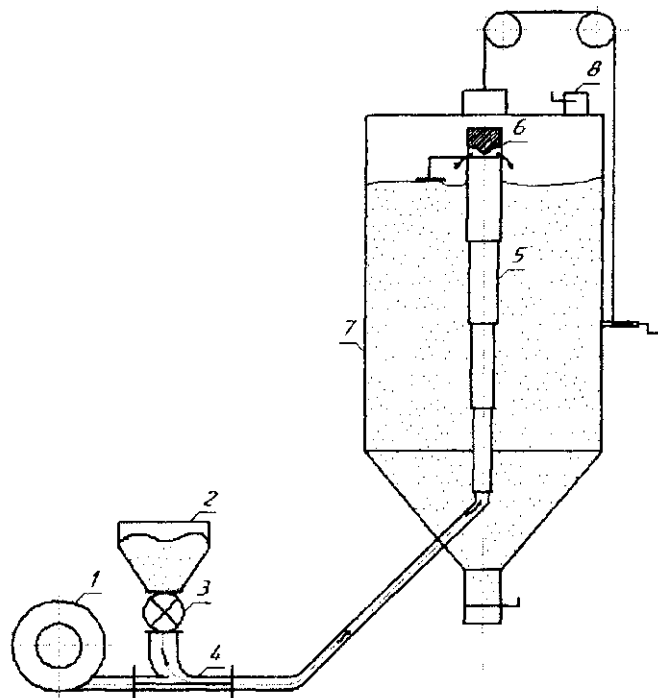
Аналогичный процесс происходит при выгрузке муки из автомуковозов аэрозольтранспортными установками (рисунок 3).



1–пористая перегородка; 2–конический колпак; 3–трубопровод; 4–корпус камерного питателя; 5–насадок; 6–телескопический трубопровод с клапаном; 7–бункер; 8–пылевидный мешок

**Рисунок 3 – Схема загрузки бункера аэрозольтранспортными установками**

Принцип работы установки заключается в следующем. Сжатый воздух от распределителя компрессорной станции поступает под пористую перегородку 1 одного из камерных питателей автомуковоза. Воздух, равномерно распределяясь по всей площади днища, оживляет материал. При достижении давления в камере, равного сопротивлению всей длины материалопровода 3, включая телескопический трубопровод 4, происходит выдавливание в него аэросмеси и дальнейшее ее транспортирование в бункер 7. Очищенный воздух проходит через пылевидный мешок 8 и выбрасывается наружу. Загрузка бункера 7 происходит так же, как и загрузка бункера с помощью пневмоперегрузателей всасывающее-нагнетательного принципа действия. В начальный период загрузки высота телескопического трубопровода минимальна, поэтому производительность загрузки будет выше производительности в конечный период загрузки. В целом время загрузки сокращается. При выгрузке бункера с помощью пневмотранспортных установок нагнетающего принципа действия (рисунок 4) необходимо производить регулирование подачи материала в приемник типа «тройник»: увеличивать подачу материала в начальный период загрузки, когда патрубки телескопического трубопровода входят один в другой, и постепенно ее уменьшать с увеличением высоты загрузки (патрубки телескопического трубопровода полностью выдвинуты).



1-вентилятор; 2-емкость; 3-шлюзовый затвор; 4-приемник; 5-телескопический трубопровод; 6-клапан; 7-бункер; 8-выпускной патрубок с задвижкой

**Рисунок 4 – Схема загрузки бункеров с помощью установки нагнетающего принципа действия**

Определим, как изменяется производительность загрузки в зависимости от высоты подъема материала.

Принимаем в начальный период загрузки высоту подъема материала равной нулю. Тогда потери давления ( $H_{nm}$ ) в нагнетающей пневмотранспортной установке при транспортировании сыпучих материалов (см. рисунок 4) будут меньше потерь давления при традиционной схеме загрузки материала в бункер (см. рисунок 1) на величину потерь давления от трения при движении аэросмеси в прямолинейном вертикальном участке материалопровода ( $H_{тр.в}$ ) и потерь давления на подъем материала по вертикали ( $H_{под.}$ ). Используя известные методики расчета пневмотранспортных установок [1], можно определить значение производительности в начальный период загрузки по следующей формуле:

$$G_{нач.} = \frac{(2H_{nm} - \zeta_{пр} \rho v^2 - 2H_q - 2H_{отв.ч}) \rho Q}{2(i\rho Q + H_q K_2 + H_{отв.ч} K_{отв.} + \Delta u i Q)}, \quad (1)$$

- где  $H_{nm}$  – потери давления в пневмотранспортной установке, Па;
- $\zeta_{пр}$  – коэффициент, зависящий от типа приемного устройства;
- $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;
- $v$  – скорость воздуха, м/с;
- $H_q$  – потери давления от трения при движении в материалопроводе чистого воздуха, Па;
- $H_{отв.ч}$  – потери давления в отводе при движении чистого воздуха, Па;
- $Q$  – расчетный расход воздуха в материалопроводе, м<sup>3</sup>/ч;
- $i$  – потери давления на сообщение скорости продукту при  $G=1$  т/ч, Па;
- $K_2$  – экспериментальный коэффициент при движении аэросмеси в горизонтальном материалопроводе;
- $K_{отв.}$  – коэффициент сопротивления при движении продукта в отводе;
- $\Delta u$  – коэффициент, зависящий от величины центрального угла отвода, отношения радиуса

отвода к диаметру материалопровода и длины прямолинейного участка за отводом.

Проведенные нами теоретические исследования позволили построить график изменения производительности загрузки бункера в зависимости от высоты подъема материала (рисунок 5). Из графика видно, что производительность загрузки при максимальной высоте подъема материала ( $h = 20$  м) составляет ( $G_{кон} = 10$  т/ч), а в начальный период загрузки составляет ( $G_{нач} = 20$  т/ч), что согласуется с проведенными ранее исследованиями [3–4], причем, чем выше высота подъема материала, тем больше разница производительности в начальный и в конечный период загрузки.

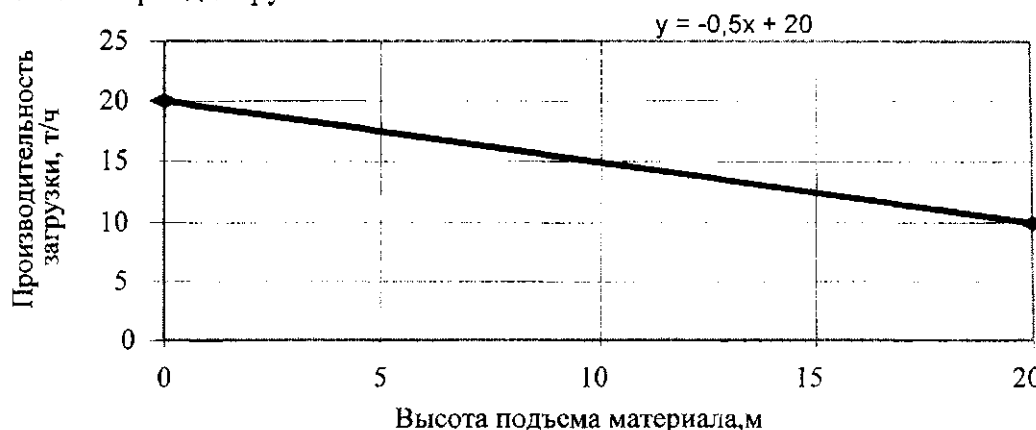


Рисунок 5 – Изменение производительности загрузки в зависимости от высоты подъема материала

Производительность ( $G_{шл}$ ) барабанного шлюзового затвора определяем по формуле:

$$G_{шл} = k_3 V \rho_v n_p, \quad (2)$$

где  $k_3$  – коэффициент заполнения ячеек ротора шлюзового затвора,  $m^2$ ;  
 $V$  – емкость всех ячеек ротора шлюзового затвора,  $m^3$ ;  
 $\rho_v$  – плотность материала,  $kg/m^3$ ;  
 $n_p$  – частота вращения ротора,  $об/с$ .

В связи с тем, что с увеличением частоты вращения ротора значение коэффициента заполнения ячеек уменьшается, а утечки (подсос) воздуха растут, оптимальной частотой вращения ротора, исходя из опыта эксплуатации, следует считать  $n_p = 0,3–0,7$   $об/с$ . При этом коэффициент заполнения ( $k_3$ ) для зерновых материалов можно принимать равным  $0,7–0,8$ .

Зная, как изменяется производительность загрузки в зависимости от величины подъема материала, легко определить изменение частоты вращения ротора шлюзового затвора ( $n_p$ ) в зависимости от изменения времени загрузки ( $\tau$ ). В начальный период загрузки

$$n_{p,н} = \frac{G_{нач}}{V \rho_v k_3}, \text{ в конечный период загрузки } n_{p,к} = \frac{G_{кон}}{V \rho_v k_3}, \text{ где } G_{нач} \text{ и } G_{кон} \text{ – начальное и конечное значение производительности.}$$

Время загрузки бункера любой высоты снизу с помощью телескопического трубопровода всегда меньше времени загрузки этого же бункера традиционным способом сверху.

К примеру, масса материала, загружаемого в бункер, равна 20 т.

Производительность в начальный период загрузки путем расчетов по формуле (1) получилась равной  $G_{нач} = 20$  т/ч, а в конечный период загрузки –  $G_{кон} = 10$  т/ч. Тогда, исходя из формулы (2), частота вращения ротора шлюзового затвора ( $n_p$ ) изменяется от  $0,6$   $об/с$  до  $0,3$   $об/с$  за среднее время загрузки  $\tau_{ср} = 1,5$  ч. Изменение частоты вращения ротора ( $n_p$ ) от времени загрузки ( $\tau$ ) показано на рисунке 6.

Оно описывается линейным уравнением вида

$$n_p = -0,2\tau + n_{p,нач}, \quad (3)$$

где  $n_{p.нач}$  – частота вращения ротора шлюзового затвора в начальный период загрузки, об/с;  
 $\tau$  – время загрузки, ч.

Таким образом, время загрузки бункера любой высоты снизу с помощью телескопического трубопровода всегда меньше времени загрузки этого же бункера традиционным способом сверху.

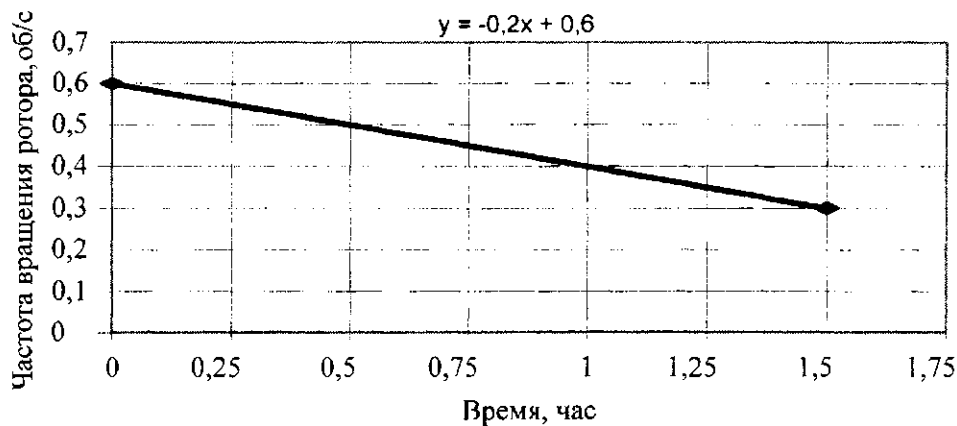
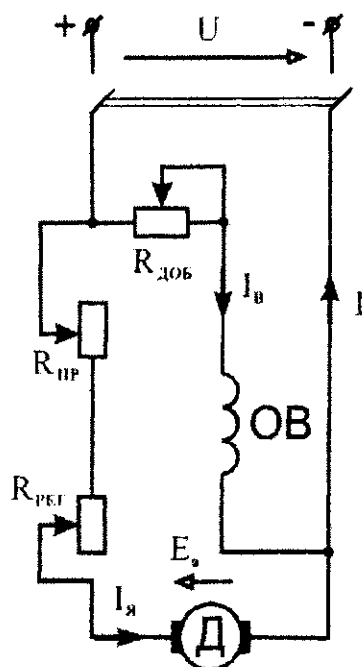


Рисунок 6 – Изменение частоты вращения ротора шлюзового затвора от времени загрузки



$OB$  – обмотка возбуждения;  $R_{np}$  – пусковой реостат;  $R_{рег}$  – регулировочный реостат (тензорезистор);  
 $R_{доб}$  – добавочное сопротивление;  $I$  – ток, потребляемый двигателем;  
 $I_{\sigma}$  – ток обмотки возбуждения;  $I_{я}$  – ток якоря.  $U$  – напряжение питания;  $E_{\sigma}$  – противо-ЭДС

Рисунок 7 – Электрическая схема регуляции частоты вращения шлюзового затвора

Эффективное регулирование производительности загрузки путем изменения частоты вращения шлюзового затвора можно осуществить с помощью предложенной нами электрической схемы (рисунок 7).

Частота вращения определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{C_e \Phi} = \frac{U - I_{я} (R_{\sigma я} + R_{рег})}{C_e \Phi} \quad (4)$$

Из приведенного уравнения (4) следует, что регулировать частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно изменением:

- 1) подводимого к электродвигателю напряжения  $U$ ;
- 2) сопротивления цепи якоря  $R_{\text{я}}$  (сопротивления регулировочного реостата  $R_{\text{рег}}$ );
- 3) магнитного потока  $\Phi$ .

Примем регулирование частоты вращения изменением сопротивления цепи якоря.

Подставив в (4) выражение тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_m \Phi}, \quad (5)$$

получим следующее соотношение

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_{\text{оя}} + R_{\text{рег}})M}{C_e C_m \Phi^2}, \quad (6)$$

где  $C_e$ ,  $C_m$  – коэффициенты, величины которых постоянны для данной машины;  $R_{\text{оя}}$  – собственное сопротивление обмотки якоря.

Обозначив  $\frac{U}{C_e \Phi} = n_0$ ,  $\frac{(R_{\text{оя}} + R_{\text{рег}})M}{C_e C_m \Phi^2} = \Delta n$ , уравнение (6) примет вид

$$n = n_0 - \Delta n, \quad (7)$$

где  $n_0$  – частота вращения идеального холостого хода ( $M = 0$ );

$\Delta n$  – изменение частоты вращения, вызванное действием нагрузки, т.е. моментом  $M = M_2 + M_0$ . ( $M_0$  – момент холостого хода,  $M_2$  – противодействующий момент, создаваемый механизмом, который приводится в движение данным двигателем).

Соотношения (6) – (7) объясняют механизм регулирования частоты вращения: при увеличении регулировочного сопротивления  $R_{\text{рег}}$  частота  $n_0$  остается постоянной, а изменение частоты вращения  $\Delta n$  увеличивается. Увеличение  $\Delta n$  при неизменной частоте  $n_0$  приводит согласно (7) к уменьшению частоты вращения  $n$ .

### Заключение

В результате проведенных исследований получена формула, позволяющая определить производительность пневмотранспортной установки в начальный период загрузки бункера сыпучим материалом. Показано, что эффективное регулирование производительности загрузки путем изменения частоты вращения шлюзового затвора можно осуществить с помощью предложенной нами электрической схемы. Установлен механизм регулирования частоты вращения шлюзового затвора. Показано, что при увеличении регулировочного сопротивления  $R_{\text{рег}}$  частота  $n_0$  остается постоянной, а изменение частоты вращения  $\Delta n$  увеличивается.

### Литература

1. Володин Н.П. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам. – М.: Колос, 1984. – 182 с.
2. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях.. – 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. Чиркин В.П., Гальмак А.М. Устройство для пневматического транспортирования материалов. Патент № 7586 РБ.
5. Казанцев В.В., Ривкин М.Б. Об оптимальных режимах горизонтального пневмотранспорта в плотной фазе //И.Ф.Ж. – 1978. – ТХХХIV, –.№3. – с.417. – 421.

Поступила в редакцию 19.05.2009