

**М.Н. Чальцев /д.т.н./**

*Автомобильно-дорожный институт*

*ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (Горловка)*

## ТЕОРИЯ И РАЗРАБОТКА ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*Разработан уточненный метод аэродинамического расчета пневмотранспортных систем, основанный на классических законах аэро- и гидромеханики. Разработан и прошел промышленные испытания новый тип питателя пневмотранспортных систем – малогабаритный камерный питатель, обеспечивающий существенное сокращение материальных и энергетических затрат при его изготовлении и эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *пневмотранспортная система, аэродинамический расчет, малогабаритный камерный насос, бысродействующий затвор.*

Пневматический трубопроводный транспорт твердых дисперсных материалов широко применяется во многих отраслях промышленности, связанных с производством, переработкой и хранением разного рода сыпучих грузов. Пневмотранспортные системы (ПТС) просты по своей конструкции, компактны, защищают грузы от атмосферных воздействий, а окружающую среду – от запыления. Однако дальнейшее расширение сферы использования пневмотранспорта часто сдерживается, во-первых, отсутствием научно обоснованных и надежных инженерных методов аэродинамического расчета ПТС, а, во-вторых, ограниченным объемом и номенклатурой питателей ПТС, выпускаемых промышленностью, в том числе таких, которые отвечают современным требованиям.

Важнейшей задачей аэродинамического расчета пневмотранспортирования сыпучих материалов является правильная оценка потерь давления вдоль трассы трубопровода, которые обеспечивают наименьшие энергозатраты при устойчивом процессе транспортирования с заданной производительностью.

Наиболее часто в практике проектирования ПТС используется экспериментальная зависимость, предложенная Б. Бартом [1]:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\lambda_a + \mu \lambda_s) \rho_a \frac{U_a^2}{2D},$$

где  $\Delta P/L$  – удельные потери давления в трубопроводе длиной  $L$ ;  $\lambda_a$  – коэффициент трения воздуха о стенки трубы;  $\mu$  – массовая концентрация смеси;  $\lambda_s$  – дополнительный коэффициент сопротивления, отражающий наличие в смеси твердого материала, определяемый эксперимен-

тально;  $\rho_a$  и  $U_a$  – плотность и скорость движения воздуха;  $D$  – диаметр трубы.

Известны попытки создания аналитических методов расчета [2-7], но они справедливы только для потоков низкой концентрации (до 5 кг/кг) и поэтому большого распространения не получили. Большинство промышленных ПТС работают при концентрациях 15-25 кг/кг и более высоких.

В большинстве известных работ предлагаются полуэмпирические методы расчета, которые не обеспечивают требуемую точность расчетов.

Таким образом, до настоящего времени не была разработана научно обоснованная методика гидравлического расчета установившихся пневмотранспортных потоков, которая была бы применима для широкого диапазона условий транспортирования.

Цель настоящей работы заключается в разработке уточненного метода аэродинамического расчета установившихся потоков в горизонтальных трубопроводах для проектирования промышленных ПТС, а также малогабаритных камерных питателей ПТС, с целью обеспечения надежности и эффективности их работы.

При аэродинамических расчетах ПТС исходными уравнениями для решения задачи движения газовзвеси в трубе служат гидравлические уравнения неразрывности, энергетического баланса (аналог известного уравнения Бернулли), гидравлических сопротивлений, а также уравнения состояния газа. При их записи полагается, что процесс расширения газа изотермический, а поток является одномерным, т.е. температура смеси в процессе транспортирования не изменяется, а ее плотность и концентрация изменяются при переходе от одного сечения трубопровода к другому.

Рассматривая задачу об удельных потерях давления в трубопроводе, т.е. на коротких его отрезках, считаем несущую среду несжимаемой. В этих условиях гидравлические уравнения неразрывности и движения газозвеси имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho_s S U_s &= G_s, \\ \rho_a (1-S) U_a \omega &= G_a, \\ \rho_m \frac{U_m^2}{2} + P + \Delta P &= const, \end{aligned}$$

где  $\rho_s, \rho_m$  – плотность твердых частиц, плотность смеси воздуха и твердых частиц, соответственно;  $U_s$  – скорость движения твердых частиц;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы;  $G_s$  и  $G_a$  – массовый расход материала и воздуха;  $U_m$  – скорость движения смеси воздуха и твердых частиц;  $\omega$  – скорость витания твердых частиц;  $P$  – давление;  $\Delta P$  – потери давления на участке трубопровода длиной  $L$ .

Последнее приведенное выражение является уравнением Бернулли для газозвеси. С учетом зависимостей, предлагаемых в работах [8,9], получено выражение:

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[ 1 + \frac{\mu^3 \left( \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2}{C^2 \left( 1 - \mu \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2} \beta_s \right] \lambda_m \frac{\rho_a U_a^2}{d^2}, \quad (1)$$

которое можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{L} &= \varphi \frac{\Delta P_a}{L}, \\ \frac{\Delta P_a}{L} &= \lambda_a \frac{\rho_a U_a^2}{d^2}, \\ \varphi &= \left[ 1 + \frac{\mu^3 \left( \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2}{C^2 \left( 1 - \mu \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2} \beta_s \right] \frac{\lambda_m}{\lambda_a}, \end{aligned}$$

где  $\Delta P/L$  – удельные потери давления при движении чистого воздуха;  $C$  – объемная концентрация твердых частиц;  $\beta_s$  – безразмерный коэффициент, являющийся аналогом коэффициента Кориолиса для потока несущей среды;  $d$  – диаметр частиц твердого материала;  $\varphi$  – коэффициент.

Проверочные расчеты по формуле (1) показали их почти полное совпадение с опытными данными. Погрешность расчетов не превышает

10 %.

Главным элементом ПТС является насос. В настоящее время большинство ПТС на Украине оборудованы устаревшими пневмовинтовыми насосами (ПВН). Для привода шнека ПВН используется электродвигатель, мощность которого составляет 3-5 кВт на перемещение 1 тонны груза за час. Так, для ПТС производительностью 100 т/час, мощность двигателя составляет 300-500 кВт.

С целью экономии электроэнергии и повышения надежности ПТС целесообразна замена ПВН на камерные насосы, в которых привод вообще отсутствует.

Однако существует проблема замены этих насосов в условиях действующего производства, т.к. высота камерного насоса намного больше высоты ПВН при одинаковой производительности. Такая замена связана с перекомпоновкой технологического оборудования и значительными капитальными затратами.

В Автомобильно-дорожном институте ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» под руководством автора разработан новый тип насоса – малогабаритный камерный питатель (МКП), который предназначен для внедрения в действующее производство без реконструкции.

Решению этой проблемы посвящены 10 лет научных исследований, в результате которых созданы новые системы управления насосом, быстродействующие затворы, устройства интенсификации процессов загрузки и разгрузки камеры питателя. Первый образец питателя НК-5 (рис. 1) успешно работает на Славянской ТЭС ПАО «Донбассэнерго» в линии подачи угольной пыли от пылеприготовительного цеха на энерго-

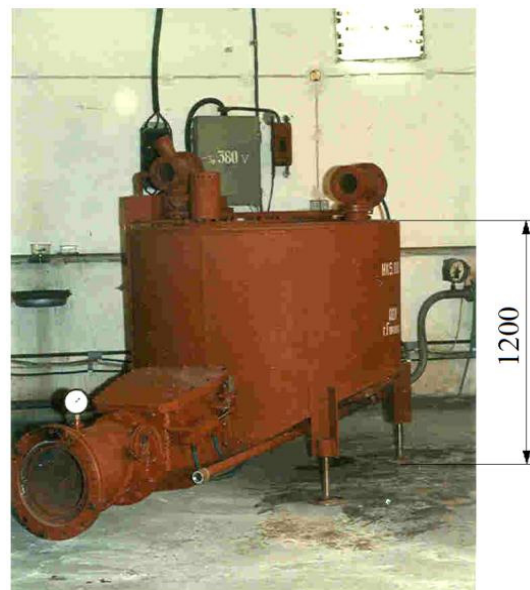


Рис. 1. Внешний вид МКП НК-5

Табл. 1. Сравнительная техническая характеристика малогабаритного и серийных камерных насосов

Показатели	Тип насоса		
	НК-5	ТА-29А	ПВН
Производительность, т/час	60	60	60
Мощность привода, кВт	силовой привод отсутствует		200
Затраты воздуха, м <sup>3</sup> /мин	45	58	50
Диаметр трубопровода, мм	300	300	300
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	2400×1420×1200	3700×3300×4700	3000×900×1200
Емкость камеры, м <sup>3</sup>	0,8	6,8	нет данных
Ориентировочная стоимость, тыс. грн	50	272,7	600

блок. Им заменен ПВН с приводом 200 кВт, благодаря чему повышена надежность работы ПТС. Принято решение об оснащении камерными насосами всех 10 линий пылеподачи.

Малогабаритные насосы подобного типа могут быть использованы во всех областях промышленности. Насос прост по конструкции, его изготовление возможно в условиях ремонтных мастерских.

Технические характеристики питателя НК-5, серийного камерного насоса ТА-29А производства ООО «Торговый дом Бецема», а также действующего ПВН приведены в табл. 1.

Из приведенных данных в табл. 1 видно, что при значительно меньших габаритах и стоимости изготовления малогабаритный питатель НК-5 обеспечивает такую же производительность, как и серийный камерный насос. По сравнению с ПВН, существенно снижены затраты электроэнергии за счет отсутствия силового привода.

Сохранение высокой производительности МКП стало возможным благодаря созданию и применению быстродействующей арматуры и органов управления камерным насосом.

Технические решения защищены патентом Украины [10] и авторскими свидетельствами [11-14].

**Выводы**

Разработан уточненный метод расчета параметров пневмотранспортирования для установленного аэродисперсного потока как сжимаемой среды, базирующийся на аэродинамических уравнениях неразрывности, энергетического баланса, гидравлических сопротивлений, а также на уравнениях состояния газа.

Разработан МКП для пылевидных материалов, обеспечивающий существенное снижение энергозатрат и повышение производительности пневмотранспортных систем.

Снижение габаритов камерного питателя является одним из перспективных направлений совершенствования ПТС.

Результаты выполненных исследований ис-

пользованы при проектировании и внедрении МКП на Славянской ТЭС и на предприятиях строительной индустрии.

**Список литературы**

1. Барт В. Аэродинамические проблемы в технологических процессах / Сб. «Мельничный пневматический транспорт за рубежом». – М.: Хлебоиздат, 1957. – С. 3-17.
2. Chaltzev M. Design technique of the pneumotransport critical regime at minor differential pressure / ТЕКА: Commission of motorisation and power industry in agriculture Lublin university of technology Volodymyr Dal East-ukrainian national university of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol.XA. – P. 29-38.
3. Comparison of saltation velocity and pickup velocity correlations for pneumatic conveying / S. Plasynski, S. Dhodapkar, G.E. Klinzing, F. Cabrejos / AIChE Symp. – 1991. – Ser.87. – P. 78-90.
4. Ratnayake C. A comprehensive scaling up technique for pneumatic transport systems. Thesis. – Porsgrunn, Norway: Telemark University College, 2005. – 299 p.
5. Klinzing G.E. Silids flow behavior in bends: assessing fine solids buildup / Powder technology. – 2000. – No.113 – P. 124-131.
6. Кузнецов А.А. К вопросу о методах расчета процессов пневмотранспорта сыпучих строительных материалов [Электронный ресурс] / Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №3. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6438>
7. Хлудеев В.И., Ефременко А.Н., Ефременко С.Н. Энергосберегающие технологии пневмотранспорта сыпучих материалов. Практические преимущества модернизированных энергосберегающими модулями ООО «Технологии энергосбережения» камерных насосов российского производства, которые экономят электроэнергию, перед дорогостоящими винтовыми насосами «IBAУ» – Германия. [Электронный ресурс]. – Режим дос-

- тупа: <http://download.beton.ru/news/tes/Power%20saving%20up.pdf>
8. Криль С.И., Чальцев М.Н. Уравнение Бернулли для потока газовзвеси / Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т.6(78), №1. – С. 3-8.
  9. Чальцев М.Н. О гидравлическом расчете трубопроводов для пневмотранспортных систем / Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Сер. Машиностроение. – 2000. – Т.1, №38. – С. 50-54.
  10. Патент 45804 Україна, МПК В65G 53/04. Спосіб пневматичного транспортування дрібнофракційних сипучих матеріалів / М.М. Чальцев, Б.С. Бугайов – №2001074787; заявл. 10.07.2001; опубл. 01.02.02., Бюл. №2.
  11. А.с. 1216099 СССР, МКИ<sup>4</sup> В65G53/46. Пневмозатор камерного питателя / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.И. Бабенышев, Е.В. Павлов. – №3820068/27-11; заявл. 06.12.84; опубл. 07.03.86, Бюл. №9.
  12. А.с. 1416403 СССР, МКИ<sup>4</sup> В65G53/40. Устройство для загрузки сыпучего материала в пневмотранспортную установку / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, Л.М. Португальский, В.В. Бражников. – №4183987/24-11; заявл. 23.01.87; опубл. 15.08.88, Бюл. №30.
  13. А.с. 1668257 СССР, МКИ<sup>4</sup> В65G53/40. Питатель для пневматической подачи сыпучего материала / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.Н. Павлюченко, В.А. Педос. – №4739026/11; Заявл.19.09.89; Опубл. 07.09.91, Бюл. №29.
  14. А.с. 1523809 СССР, МКИ<sup>4</sup> F16J15/00. Способ уплотнения / М.Н. Чальцев, Б.Е. Бугаев, В.И. Бабенышев, Е.В. Павлов. – №4318076/31-29; заявл. 19.10.87; опубл. 23.11.89, Бюл. №43.

**M.N. Chaltsev /Dr. Sci. (Eng.)/**

*Automobile and Highway Institute Donetsk National Technical University (Gorlovka)*

### WAYS OF IMPROVING PNEUMATIC TRANSPORT SYSTEMS

**Background.** *Pneumatic tube transport of solid disperse materials is widely used in many industries that deal with production, processing and storage of various types of granular bulk. Pneumatic transport systems (PTS) are easy to construct, they are compact and protect the bulk from atmospheric effects and the environment from dust. However, the further development of pneumatic transport usage is often constrained first of all due to the lack of scientifically substantiated and reliable engineering techniques of PTS aerodynamic calculation, secondly, due to the restricted volume and range of the manufactured PTS feeders including those which comply with modern requirements.*

**Materials and/or methods.** *As a result of a 10-year research, the scientifically substantiated engineering technique of aerodynamic calculation of the settled flows in horizontal pipelines has been developed, which enables the design of industrial pneumatic transport systems aiming at the provision of reliability and efficiency of their operation.*

**Results.** *PTS pumps have been improved. New high-speed penstocks have been designed. The dependence of aerodynamic calculations of the settled flows in the horizontal pneumatic transport pipeline has been drawn. A new type of a PTS pump has been designed and industrially tested, which is a small-sized chamber pump (SCP) for powder-like substances which provides a considerable reduction of material costs and energy losses and improves the efficiency of pneumatic transport systems. The basic principles of its construction design have been worked out.*

**Conclusion.** *The small-sized chamber pump which has been designed is introduced at Slavyansk Thermal Power Plant and at the construction industry enterprises. The annual economic effect of one SCP makes up 400000 hrn.*

**Keywords:** *pneumatic transport system, aerodynamic calculation, small-sized chamber pump, high-speed penstock.*

#### Сведения об авторах

**М.Н. Чальцев**

Телефон: +380 (624) 55-25-14

Эл. почта: [drukfnf@rambler.ru](mailto:drukfnf@rambler.ru)

*Статья поступила 22.06.2015 г.*

*© М.Н. Чальцев, 2016*

*Рецензент д.т.н., проф. Н.И. Мищенко*