

**Чальцев М. Н., д-р. техн. наук, проф., Войцеховский С. В., канд. техн. наук**  
**Автомобильно-дорожный институт**  
**Донецкого национального технического университета**

## **РАСЧЕТ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Разработана методика расчета удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов в широком диапазоне изменения видов материалов и типоразмеров транспортного трубопровода, заключающаяся в определении коэффициента потерь на трение твердой фазы. Максимальная погрешность расчета при движении транспортного потока без фазы дьюнообразования не превышает 20 %, что может считаться приемлемым для решения инженерных задач.*

### **Постановка проблемы**

Системы и устройства пневматического транспорта мелкодисперсных материалов нашли широкое применение в таких отраслях промышленности, как угольная, химическая, энергетика, сельское хозяйство, строительство и др., в которых они являются неотъемлемой частью многих технологических процессов. Однако, несмотря на целый ряд преимуществ систем пневмотранспорта их дальнейшее развитие сдерживается из-за сравнительно невысокой надежности, а также остро стоящими вопросами энергосбережения. Причем, в большинстве случаев потери на трение в транспортном трубопроводе составляют три четверти и выше в доле общих энергозатрат на транспортирование материала. Поэтому дальнейшее совершенствование методик расчета удельных потерь давления при пневматическом транспорте сыпучих материалов позволит создавать пневмотранспортные системы с более высокими показателями энергопотребления, качества транспортирования и долговечности, и представляет собой важную и актуальную задачу.

### **Анализ последних исследований**

На сегодняшний день проведено много исследований в области создания методик расчета систем пневмотранспорта, в частности, определения энергетических затрат на транспортирование сыпучего материала по трубопроводу. Некоторые из них основаны на богатом экспериментальном и теоретическом материале и хорошо разработаны [1, 2, 3, 4]. Однако следует отметить, что область их применения зачастую ограничена используемыми в них характеристиками материалов и типоразмерами трубопроводов. И хотя различные методики довольно хорошо качественно согласуются между собой и экспериментальными данными, тем не менее, в количественных оценках между ними имеются существенные различия, достигающие 70 и более процентов.

Так, большинство авторов для определения потерь давления на транспортировку материала  $dp$ , отнесенных к единице длины трубопровода  $dl$ , используют известную зависимость [1]:

$$\frac{dp}{dl} = \lambda_m \frac{\rho_a V_a^2}{2D},$$

где коэффициент потерь на трение определяется как

$$\lambda_m = \lambda_a + \lambda_s.$$

Здесь  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, индексы  $m$  относятся к смеси воздуха и материала,  $a$  – к воздуху,  $s$  – к твердой фракции.

Определение коэффициента трения для чистого воздуха  $\lambda_a$  в основном производится по аналогии с гидравлически гладкими трубопроводами (формула Блазиуса):

$$\lambda_a = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}.$$

Что касается определения составляющей коэффициента потерь на трение для твердой фазы  $\lambda_s$ , то, как отмечалось выше, существует большое количество методик, в большей или меньшей степени адекватно описывающих процесс. В рамках настоящей статьи не представляется возможным привести весь спектр имеющихся в литературе методик определения  $\lambda_s$ , но в качестве иллюстрации на рисунке 1 изображены результаты расчета удельных потерь давления при транспортировке сжатым воздухом частиц полистирола, определенные по методикам, предлагаемым Klinzing G. E. (сплошная линия) и Mills D. (пунктирная линия) [2, 3]. Здесь же нанесены экспериментальные значения в виде тонкой пунктирной линии [2]. Диаметр транспортного трубопровода 50 мм, средний диаметр частиц  $d_s = 2,4$  мм, линия 1 соответствует чистому воздуху, линии от 2 до 6 – массовому расходу твердой фазы  $G_s = 251; 497; 743; 995$  и  $1244$  кг/час, соответственно. На рис. 2 приведены результаты расчета по этим же методикам для солода ( $d_s = 5$  мм, линия 2) и золы ( $d_s = 40$  мкм, линии 3 и 4) [2]. Диаметр транспортного трубопровода 100 мм, значения  $G_s = 228; 500$  и  $600$  кг/ч, соответственно. Как видно из приведенных зависимостей, согласование расчетных и экспериментальных кривых, полученных по одной и той же методике, существенно отличаются от удовлетворительного совпадения для одного материала, до неудовлетворительного для другого.

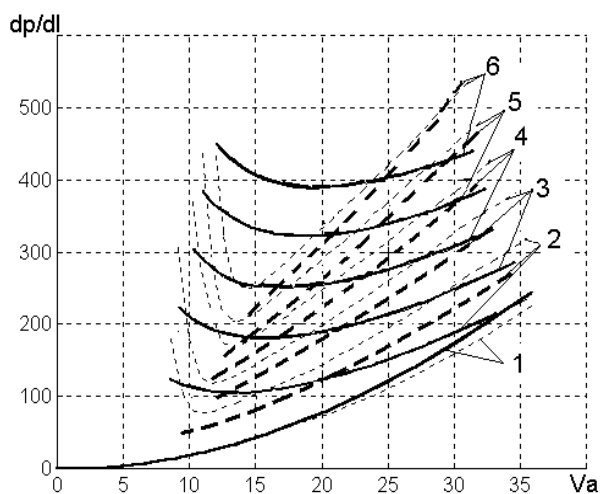


Рисунок 1 – Удельные потери давления в трубопроводе при транспортировке полистирола

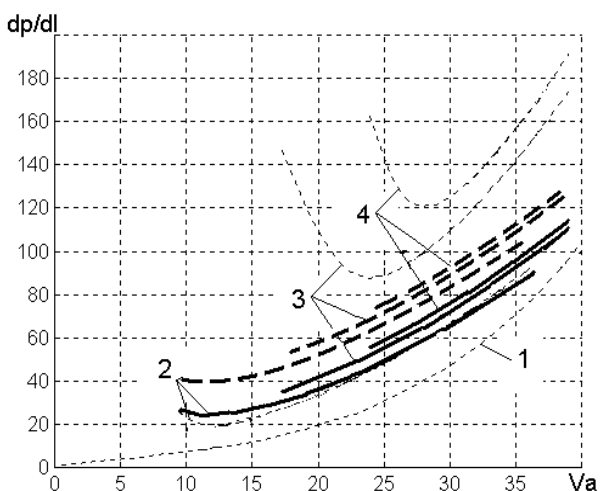


Рисунок 2 – Удельные потери давления при транспортировке солода и золы

Такая же тенденция характерна и для других методик определения удельных потерь давления при широком варьировании плотностей и диаметров частиц транспортируемого материала (от десятков мкм до миллиметров), а также диаметров трубопроводов.

### ***Постановка задачи***

На основании приведенного анализа существующих методик определения удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов поставлена задача по уточнению методики расчета удельных потерь давления, которая бы учитывала отношение диаметров частиц материала и трубопровода, а также связывала бы геометрические и режимные параметры взвесенесущего потока. Для решения поставленной задачи необходимо произвести математическую обработку существующих экспериментальных данных по удельным потерям давления, и по результатам расчетов получить обобщенную зависимость для определения  $\lambda_s$ .

### ***Расчет потерь давления***

При нахождении аналитической зависимости для  $\lambda_s$  использовались экспериментальные данные для широкого диапазона транспортируемых материалов и типоразмеров транспортных трубопроводов: цемента, угольной пыли и золы [2], полистирола, солода и баритов [3], пшеницы и ячменя [4] при варьировании диаметров трубопроводов от 40 до 150 мм. В качестве значащих факторов использовались отношения основных характеристик пневмотранспортного потока: плотность  $\rho_s$ , диаметр  $d_s$  и скорость витания  $w_s$  твердых частиц; плотность  $\rho_a$  и скорость  $V_a$  сжатого воздуха; диаметр трубопровода  $D$ ; средняя скорость материала в трубопроводе  $V_s$ ; а также безразмерные параметры – массовая концентрация твердой фазы  $\mu_s = G_s / G_a$  и чисел Фруда для воздуха  $Fr_a = V_a / \sqrt{gD}$  и частиц  $Fr_s = w_s / \sqrt{gd_s}$ .

Обработка экспериментальных данных осуществлялась численными методами с использованием математической статистики [5]. Полученные значения максимальной погрешности определения  $dp/dl$  в зависимости от перечисленных факторов контролировались определением дисперсии воспроизводимости при доверительной вероятности 0,95:

$$S_e^2 = \left( \frac{\sum \delta_i}{2} \right)^2,$$

где  $\sum \delta_i$  – суммарная ошибка определения  $dp/dl$ , включая ее статистическую составляющую.

В результате математической обработки экспериментальных данных по удельным потерям давления в транспортном трубопроводе была определена аналитическая зависимость для коэффициента потерь на трения от твердой фракции пневмотранспортного потока:

$$\lambda_s = 4 \cdot 0,00316 \cdot \mu_s \cdot \frac{d_s}{D} \cdot Fr_a^{-0,25} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot \left( \frac{V_a - V_s}{w_s} \right)^{0,25}.$$

Следует отметить, что при скоростях транспортирующего воздуха ниже критической скорости транспортирования, суммарная ошибка определения  $dp/dl$  существенно возрастала, что можно объяснить осаждением материала на стенках трубопровода, приводящего к дюнообразованию. При этом процесс транспортирования становится нерегулярным и плохо поддается математической обработке. В целом можно принять приведенную зависимость для определения потерь на трение при движении транспортного потока без фазы дюнообразования. Максимальная погрешность расчета при этом не превышает 20 % в широком диапазоне изменения типоразмеров транспортных трубопроводов и видов транспортируемых материалов,

что можно считать приемлемым для решения инженерных задач. В качестве иллюстрации на рисунках 3 и 4 приведены результаты расчета удельных потерь давления по разработанной методике при условиях, соответствующих изображенным на рисунках 1 и 2 (обозначения те же).

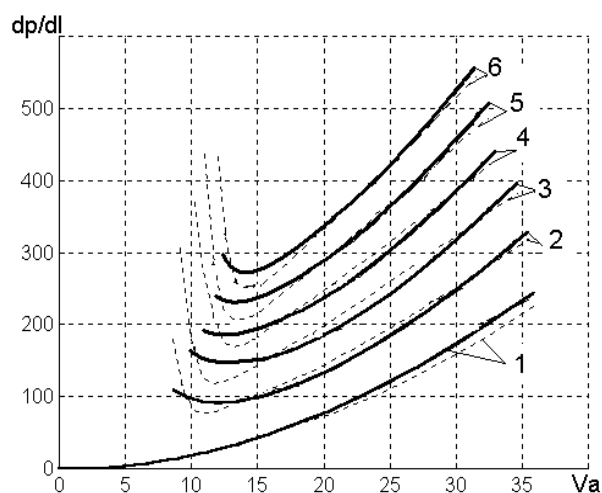


Рисунок 3 – Удельные потери давления в трубопроводе при транспортировке полистирола

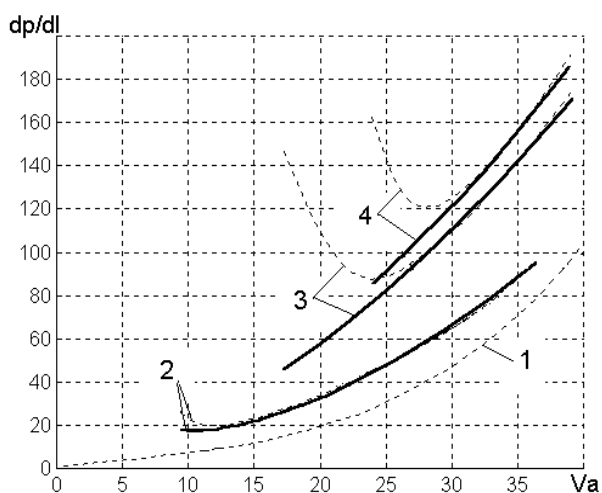


Рисунок 4 – Удельные потери давления при транспортировке солода и золы

### ***Выводы и перспективы дальнейших исследований***

Разработана методика расчета удельных потерь давления при пневматическом транспортировании мелкодисперсных материалов в широком диапазоне изменения видов материалов и типоразмеров транспортного трубопровода, заключающаяся в определении коэффициента потерь на трение твердой фазы. Максимальная погрешность расчета при движении транспортного потока без фазы дьюнообразования не превышает 20 %, что может считаться приемлемым для решения инженерных задач.

Данная методика не дает удовлетворительного совпадения расчетных и экспериментальных данных при высоких концентрациях твердой фазы пневмотранспортного потока с элементами дьюнообразования, поэтому перспективой дальнейших исследований является ее дополнение условиями, учитывающими явления, возникающие при докритической скорости транспортировки.

### ***Список литературы***

1. Голобурдин А. И. Пневмотранспорт в резиновой промышленности / А. И. Голобурдин. – М.: Химия, 1983. – 161 с.  
Goloburdin A. I. Pnevmotransport v rezinovoy promyshlennosti (Pneumatic Conveying in Rubber Processing Industry) / A. I. Goloburdin. – М.: Khimiya, 1983. – 161 s.
2. Klinzing G. E. Pneumatic conveying of solids / G. E. Klinzing. – Pittsburg, USA, 1997. – 592 p.
3. Mills D. Pneumatic conveying design guide / D. Mills. – Glasgow, UK, 1990. – 638 p.
4. Зуев Ф. Г. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф. Г. Зуев. – М.: Колос, 1976. – 344 с.  
Zuyev F. G. Pnevmaticheskiy transport na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah (Pneumatic Conveying in Grain Processing Industries) / G. F. Zuyev. – М. Kolos, 1976. – 344 s.
5. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.  
Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov (Mathematics Manual for Researches and Engineers) / G. Korn, T. Korn – М.: Nauka, 1977. – 832 s.