

С. И. КРИЛЬ^{*}, М. Н. ЧАЛЬЦЕВ^{}**

^{} Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*^{**} Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета МОН Украины, Горловка*

К ВОПРОСУ О МЕТОДИКАХ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ТРУБАМ

Получено 23.11.2009

Приведены научно обоснованные расчетные зависимости для определения основных параметров пневмотранспорта твердых дисперсных материалов по горизонтальным прямым трубам – критической скорости потока воздуха и удельных потерь давления. Описаны физические модели, положенные в основу методик расчета вышеуказанных параметров. Приведены результаты сопоставления расчетных значений этих параметров с их экспериментальными значениями в широком диапазоне изменения условий пневмотранспорта.

Наведено науково обґрунтовані розрахункові залежності для визначення основних параметрів пневмотранспорту твердих дисперсних матеріалів по горизонтальних прямих трубах – критичної швидкості потоку повітря і питомих втрат тиску. Описано фізичні моделі, покладені в основу методик розрахунку вищезазначених параметрів. Наведено результати зіставлення розрахункових значень цих параметрів з їхніми експериментальними значеннями у широкому діапазоні зміни умов пневмотранспорту.

The paper presents the scientifically based calculations for the dependences of the basic parameters for pneumatic transportation of disperse solid materials in horizontal straight pipelines – critical velocity of airflow and a specific pressure gradient. The physical models are described which represent the basis of the method for calculation of the above parameters of transportation. The results are presented on the comparison of computational and experimental data in a wide range of the pneumatic transport conditions.

ВВЕДЕНИЕ

Пневматический трубопроводный транспорт сыпучих материалов широко используется в различных отраслях промышленности, в частности, в теплоэнергетике при подаче угольной пыли к топкам и удалении золы; железнодорожном и водном транспорте при перезагрузке зерна, цемента, песка и многих других сыпучих материалов; при удалении отходов предприятий металлургической и химической промышленности; на зерноперерабатывающих предприятиях и прочее.

Для проектирования и создания пневмотранспортных установок и обеспечения надежности и эффективности их работы необходимы научно обоснованные методики аэродинамического расчета этих установок, разработанные на основе специальных теоретических и экспериментальных исследований потоков газозвесей в трубах.

В настоящее время фундаментальные исследования потоков газозвесей проводятся в трех направлениях: изучение турбулентности [1–5]; исследование физического механизма движения твердых частиц при пневмотранспорте [6–9]; изучение интегральных параметров – перепада давления по длине трубопровода и критической скорости пневмотранспортирования [10–20].

При исследовании перепада давления большое внимание уделяется изучению гидравлического сопротивления трения при стабильном пневмотранспортировании по прямым горизонтальным трубам, поскольку потоки газозвесей в таких трубах более сложные по своей кинематической структуре и динамике, нежели соответствующие потоки в вертикальных трубах. При этом считается, что перепад давления на концах рабочего участка трубы мал в сравнении с давлением в начальном сечении этого участка. Это дает

возможность рассматривать рабочий участок трубы сравнительно коротким, а газ (воздух) считать несжимаемой средой [21]. В случае длинного трубопровода, когда сжимаемостью воздуха уже нельзя пренебречь, трубопровод условно разбивают на короткие расчетные участки, на каждом из которых определяют перепад давления без учета сжимаемости, после чего результаты расчетов суммируют по всей длине трубопровода.

Обзор работ, посвященных изучению перепада давления ΔP_m при пневмотранспорте по горизонтальным трубам, позволяет сделать вывод, что большинство предложенных расчетных зависимостей для определения величины ΔP_m сводятся к одной из следующих двух формул:

$$\Delta P_m = (1 + B_1 \cdot \alpha_m) \lambda \frac{L \rho U^2}{D} \quad (1)$$

или

$$\Delta P_m = (\lambda + B_2 \cdot \alpha_m) \frac{L \rho U^2}{D}, \quad (2)$$

где L – длина расчетного участка трубы;

D – внутренний диаметр трубы;

ρ – плотность воздуха;

U и λ – средняя скорость и коэффициент гидравлического трения при движении воздуха;

α_m – массовая концентрация, равная отношению массового расхода сыпучего материала к массовому расходу воздуха;

B_1 и B_2 – эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние твердых частиц на величину ΔP_m . Отметим, что приведенные в научной литературе опытные данные о коэффициентах B_1 и B_2 чрезвычайно разнообразны, поэтому возникают определенные трудности в выборе этих коэффициентов при расчетах перепада давления ΔP_m для тех или иных конкретных условий пневмотранспортирования.

В зависимости от средней скорости потока воздуха различают режимы стабильного (без заилиения нижней стенки трубы) и нестабильного (с заилиением нижней стенки трубы) пневмотранспорта. Режим, разделяющий режимы стабильного и нестабильного пневмотранспорта, называется критическим режимом, а соответствующая ему средняя скорость потока воздуха $U_{кр}$ – критической скоростью пневмотранспортирования. К настоящему времени предложен ряд эмпирических формул для определения критической скорости, области применения которых ограничены, как правило, условиями экспериментов, при которых были получены эти формулы. Более того, значения эмпирических коэффициентов, которые входят в расчетные формулы, могут изменяться в достаточно широких диапазонах. Например, в [20] рекомендуется формула

$$U_{кр} = b \sqrt{\alpha_m a g D}, \quad (3)$$

$$a = \frac{\rho_s}{\rho} - 1, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения;

ρ_s – плотность частиц твердого материала;

b – эмпирический коэффициент, значение которого изменяется от 0,15 до 0,3 и более, причем, от чего зависит этот коэффициент – неизвестно.

Таким образом, ограниченность, а в некоторых случаях и недопустимо низкая степень точности предложенных зависимостей для определения перепада давления и критической скорости при пневмотранспорте и большое разнообразие условий пневмотранспортирования на практике не всегда позволяет выбрать расчетную формулу, соответствующую условиям данного объекта проектирования. В этой связи весьма актуальной является разработка научно обоснованных обобщенных методик расчета интегральных параметров ΔP_m и $U_{кр}$, пригодных для практического использования в широком диапазоне изменения условий пневмотранспорта. Такие методики расчета разработаны авторами данной статьи и опубликованы, в частности, в [22, 23]. Они получены на основе определенных физических моделей движения газозвесей в трубах с использованием экспериментальных данных. Однако, по истечении времени после опубликования этих методик расчета, авторами собран более обширный экспериментальный материал по пневмотранспорту, а также проведены собственные экспериментальные исследования. Поэтому основная задача настоящей статьи – апробация разработанных методик расчета ΔP_m и $U_{кр}$ на обширном экспериментальном материале с целью установления степени достоверности этих методик.

Ниже конспективно изложены теоретические основы методик расчета удельного (на единице длины трубы) перепада давления $\Delta P_m/L$ и критической скорости $U_{кр}$, затем выписаны соответствующие расчетные зависимости, описаны характеристики сыпучих материалов и труб, используемых в экспериментах, и приведены результаты сопоставления расчетных значений параметров $\Delta P_m/L$ и $U_{кр}$ с соответствующими экспериментальными значениями.

1. УДЕЛЬНЫЙ ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ

Для определения удельного перепада давления использовано уравнение Бернулли для установившегося потока несжимаемой двухфазной среды [24]. В случае изотермического движения газозвеси как несжимаемой среды, уравнение Бернулли, представленное в форме давлений, имеет вид:

$$\rho_e \frac{U_m^2}{2} + P + Z + E = \text{const}, \quad (5)$$

$$\rho_e = \rho \beta \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} + \rho_s \beta_s \frac{C_p^3}{C^2}, \quad (6)$$

$$C_p = \frac{Q_s}{Q + Q_s}, \quad (7)$$

где ρ_e и U_m – эффективная плотность и средняя по живому сечению потока скорость движения газозвесей;

P – давление;

Z – отметка центра масс живого сечения относительно плоскости сравнения;

C и C_p – средние по живому сечению объемная и расходная концентрации твердого материала;

Q , Q_s – объемный расход воздуха и твердого материала;

β и β_s – коэффициенты Кориолиса для потоков газовой и твердой фаз смеси.

Поскольку с физической точки зрения составляющие уравнения Бернулли представляют собой удельную механическую энергию в заданном сечении потока, т.е. энергию, отнесенную к единице объема газозвесей, величина E в (5) представляет собой потерянную удельную энергию, расходуемую на преодоление сил гидравлического сопротивления.

В случае установившегося равномерного движения газозвеси по горизонтальной прямой трубе удельные кинетическая энергия и потенциальная энергия положения неизменны во всех поперечных сечениях трубы. В данном случае, записывая уравнение Бернулли (5) для любых двух поперечных сечений 1-1 и 2-2, и учитывая при этом основное гидравлическое уравнение установившегося равномерного движения несжимаемой среды в круглой трубе, получаем:

$$(P_m)_1 - (P_m)_2 = E = \frac{4\tau_0}{D} L, \quad (8)$$

где $(P_m)_1$ и $(P_m)_2$ – давление в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно;

τ_0 – среднее по периметру поперечного сечения трубы касательное напряжение;

L – расстояние между сечениями 1-1 и 2-2 или, что то же – длина расчетного участка трубы.

Величину τ_0 принимают обычно пропорциональной удельной кинетической энергии потока. В случае газозвеси удельную кинетическую энергию потока представляет собой первое слагаемое Бернулли (5), поэтому выражение для τ_0 можно написать в виде:

$$\tau_0 = \frac{\lambda_m}{4} \cdot \rho_e \cdot \frac{U_m^2}{2}, \quad (9)$$

где λ_m – коэффициент гидравлического трения при пневмотранспорте.

Заменив входящие в (6) коэффициенты Кориолиса β и β_s на их среднее значение $\beta_m = \frac{1}{2}(\beta + \beta_s)$, затем подставив (6) в (9), после чего заменив в (8) величину τ_0 ее выражением (9) и обозначив перепад давления $(P_m)_1 - (P_m)_2$ символом ΔP_m , получим:

$$\Delta P_m = \left[\rho \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} + \rho_s \frac{C_p^3}{C^2} \right] \beta_m \lambda_m \cdot \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2} \quad (10)$$

или, разделив обе части уравнения (10) на L ,

$$\frac{\Delta P_m}{L} = \left[\rho \frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} + \rho_s \frac{C_p^3}{C^2} \right] \beta_m \lambda_m \cdot \frac{1}{D} \frac{U_m^2}{2}. \quad (11)$$

Уравнение (11) преобразуется к виду

$$\frac{\Delta P_m}{L} = \left[\frac{(1 - C_p)^3}{(1 - C)^2} + \bar{\rho}_s \frac{C_p^3}{C^2} \right] \frac{\bar{\lambda}_m}{(1 - C_p)^2} \cdot \frac{\Delta P}{L}, \quad (12)$$

$$\bar{\rho}_s = \frac{\rho_s}{\rho}, \quad (13)$$

$$\bar{\lambda}_m = \frac{\beta_m \lambda_m}{\lambda}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda \rho \frac{U^2}{2D}, \quad (15)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения для самого воздуха, движущегося в трубе диаметром D со средней скоростью $U = Q / F$;

F – площадь поперечного сечения трубы;

$\Delta P / L$ – удельный перепад давления при движении воздуха.

Таким образом, на основе уравнения Бернулли для двухфазного потока получено научно обоснованное общее выражение для удельного перепада давления при

пневмотранспорте по горизонтальным трубам (12). Входящая в (12) величина $\bar{\lambda}_m$ установлена в результате обработки экспериментальных данных по измерению $\Delta P / L$.

При определении $\bar{\lambda}_m$ выявлено, что сыпучие материалы, перекачиваемые потоком воздуха по трубам, целесообразно условно разделить на две категории: мелкодисперсные и крупнодисперсные. К мелкодисперсным относятся измельченные порошкообразные твердые материалы, средняя крупность d_s которых не превышает обычно 100 мкм, а число Рейнольдса $Re_s = d_s W_s / \nu \leq 6$, где W_s – скорость витания; ν – кинематическая вязкость воздуха. К таким материалам относятся, в частности, цемент, зола, угольная пыль, концентраты руд черных и цветных металлов. Потоки смесей воздуха и измельченных сыпучих материалов называют обычно запыленными потоками. Характерным для них является то, что при стабильном пневмотранспортировании осредненная объемная концентрация твердых частиц распределяется практически равномерно по поперечному сечению трубы, при этом средние концентрации C и C_p настолько близки друг к другу, что их можно считать равными.

Установлено также, что в случае запыленных потоков величина $\bar{\lambda}_m < 1$ при $Re_s < 6$ и средних скоростях потока воздуха близких или равных критической скорости, и в пределе при $Re_s \rightarrow 6$ или $U \rightarrow \infty$ величина $\bar{\lambda}_m \rightarrow 1$. При этом неравенство $\bar{\lambda}_m < 1$ может быть следствием гашения турбулентности при наличии измельченной взвеси в потоке воздуха.

Далее используется параметр α , представляющий собой соотношение объемных расходных концентраций взвеси и воздуха, т. е.

$$\alpha = \frac{C_p}{1 - C_p}. \quad (16)$$

Этот параметр удобно выразить через задаваемые обычно величины G_s , Q и ρ_s , где G_s – массовый расход твердого материала. В этом случае имеем

$$\alpha = \frac{G_s}{\rho_s Q}. \quad (17)$$

Из уравнения (16) получаем:

$$C_p = \frac{\alpha}{1 + \alpha}. \quad (18)$$

Уравнение (12) преобразуется с учетом выражения (17) и приближенного равенства $C = C_p$ к виду

$$\frac{\Delta P_m}{L} = \bar{\lambda}_m \left[1 + (\bar{\rho}_s - 1) \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right] (1 + \alpha)^2 \cdot \frac{\Delta P}{L}. \quad (19)$$

В случае запыленных потоков эмпирическая зависимость для $\bar{\lambda}_m$ имеет вид:

$$\bar{\lambda}_m = \bar{\lambda}_{кр} \left[1 + (0,43 + 0,19 Re_s) \left(1 - \frac{U_{кр}}{U} \right)^2 \right], \quad (20)$$

$$\bar{\lambda}_{кр} = \left[1 - (1 - \varphi) th \left(47,16 \sqrt{\alpha_{кр}} \right) \right] + (1 + \alpha_{кр})^{-2}, \quad (21)$$

$$\varphi = 0,127 + (1 + 1,016 Re_s) 0,022 Re_s, \quad (22)$$

где $\alpha_{кр}$ – значение α при $Q = Q_{кр}$.

Область применения зависимостей (20) – (22) ограничена значениями $0,0002 \leq \alpha \leq 0,1$; $U \geq U_{кр}$, $Re_s \leq 6$, $d_s \leq 100$ мкм.

Крупнодисперсными считаются сыпучие материалы, средняя крупность частиц которых $d_s \leq 100$ мкм, а число $Re_s > 6$. При пневмотранспорте крупнодисперсных твердых материалов по горизонтальным трубам осредненная локальная объемная концентрация твердых частиц в общем-то неравномерно распределяется по вертикальному диаметру трубы, в результате чего поле осредненных скоростей движения газозвеси характеризуется осевой асимметрией. В данном случае, в отличие от запыленных потоков воздуха, концентрации C и C_p не равны между собой, т. е. $C \neq C_p$, коэффициент гидравлического трения газозвеси $\lambda_m > \lambda$, а следовательно, величина $\bar{\lambda}_m > 1$ при $Re_s > 6$ и средних скоростях потока воздуха, близких или равных критической скорости, и $\bar{\lambda}_m \rightarrow 1$ при $Re_s \rightarrow 6$ или $U \rightarrow \infty$.

Для определения средней объемной концентрации C рекомендуется использовать полуэмпирическое алгебраическое уравнение, полученное в области исследования трубопроводного гидротранспорта сыпучих материалов [24]:

$$C \left[1 - f_p \left(1 - \frac{C}{C_{\max}} \right)^{2,16} \left(\frac{U_{kp}}{U} \right)^{1,66} \right] = C_p, \quad (23)$$

$$f_p = 0,45 \left[1 + \operatorname{sign} x_p \cdot th \left(0,967 |x_p|^{0,6} \right) \right], \quad (24)$$

$$x_p = \lg Re_s - 0,88, \quad (25)$$

где C_{\max} – предельно возможная объемная концентрация. Величина C_p в (23) определяется по формуле (18) и считается известной при расчетах пневмотранспорта.

В случае пневмотранспорта крупнодисперсных твердых материалов удельный перепад давления вычисляется по формуле (12), при этом концентрация C находится из решения уравнения (23), а параметр $\bar{\lambda}_m$ определяется по эмпирической зависимости:

$$\bar{\lambda}_m = \bar{\lambda}_{kp} \left(1 - A \cdot th \left[1,276 \left[1 - \frac{U_{kp}}{U} \right] \cdot \lg Re_s \right] \right), \quad (26)$$

$$\bar{\lambda}_{kp} = 1 + 0,667 \left(\lg \frac{Re_s}{6} \right)^{1,94} \cdot th \left(93 \alpha_{kp}^{0,8} \right), \quad (27)$$

$$A = th \left[a \left(\bar{\lambda}_{kp} - 1 \right)^{0,707} \right], \quad (28)$$

$$a = 1,875 - 0,44 \lg Re_s. \quad (29)$$

Зависимость (26) определена в области $6 < Re \leq 3200$, $U \geq U_{kp}$, $d_s > 100$ мкм.

2. КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ПОТОКА

Как установлено в [24], единственным условием, определяющим критический режим гидротранспортирования твердых дисперсных материалов по горизонтальным прямым трубам, является равенство осредненного касательного напряжения на нижней стенке трубы при стабильном движении смеси жидкости и твердых частиц и напряжения осредненной силы трения скольжения твердого материала о нижнюю стенку трубы. Аналогичное условие определяет также критический режим пневмотранспортирования сыпучих материалов, поскольку оно физически выражает предельное динамическое равновесие между потоком газозвеси и сплошным потоком твердых частиц, перемещающихся у нижней стенки трубы. С учетом этого условия получено алгебраическое уравнение для определения критической скорости движения воздуха при пневмотранспорте:

$$\bar{\lambda}_{кр} \left[1 + (\bar{\rho}_s - 1) \frac{\alpha_{кр}}{1 + \alpha_{кр}} \right] (1 + \alpha_{кр})^2 \lambda_{кр} \frac{U_{кр}^2}{2gD} = (\bar{\rho}_s - 1) \cdot K_1, \quad (30)$$

$$K_1 = \beta_1 \alpha_{кр} \quad (31)$$

при $0 < \alpha_{кр} < 0,04$;

$$K_1 = \beta_1 \cdot 0,04 + \beta_2 (\alpha_{кр} - 0,04) \quad (32)$$

при $0,04 < \alpha_{кр} < 0,1$ для мелкодисперсных твердых материалов;

$$\bar{\lambda}_{кр} \left[\frac{(1 - C_{р,кр})^3}{(1 - C_{кр})^2} + \bar{\rho}_s \frac{C_{р,кр}^3}{C_{кр}^2} \right] \frac{\lambda_{кр}}{(1 - C_{р,кр})^2} \frac{U_{кр}^2}{2gD} = (\bar{\rho}_s - 1) \cdot K_2, \quad (33)$$

$$K_2 = 0,313 \alpha_{кр}^{0,6} \cdot th(17,27 \beta_3) \quad (34)$$

для крупнодисперсных твердых материалов.

Коэффициенты β_1 и β_2 в (31) и (32), а также β_3 в (34) зависят от отношения диаметров d_s / D .

Уравнения (29) и (32) решаются численным или графическим методом, при этом заданными считаются: $G_s, \bar{\rho}_s, Re_s, d_s, \nu, D$. В случае графического решения, например, уравнения (30), задают несколько приближенных значений критической скорости $U_{кр,i} (i=1,2,3...)$. Затем определяют соответствующие расходы воздуха $Q_{кр,i} = U_{кр,i} \cdot \pi D^2 / 4$, после чего вычисляют по формулам (17), (18) и (21) соответствующие величины $\alpha_{кр,i}, C_{р,i}$ и $\bar{\lambda}_{кр,i}$, а также определяют $\lambda_{кр,i}$. При этом коэффициенты $\lambda_{кр,i}$ вычисляются по обычным формулам гидравлики в зависимости от области изменения числа Рейнольдса $Re_i = DU_{кр,i} / \nu$ для потока воздуха: область гидравлически гладких труб, переходная область, область гидравлически шероховатых труб. Обозначив левую часть уравнения (30) через F_1 , а правую – через F_2 , строят графики зависимости функций F_1 и F_2 от $U_{кр,i}$. Абсцисса точки пересечения этих графиков соответствует искомому значению критической скорости $U_{кр}$ для заданных условий пневмотранспортирования.

Таким образом, выше конспективно изложены научно обоснованные методики расчета удельного перепада давления и критической скорости потока при пневмотранспорте. Переходим к рассмотрению вопроса о достоверности этих методик расчета.

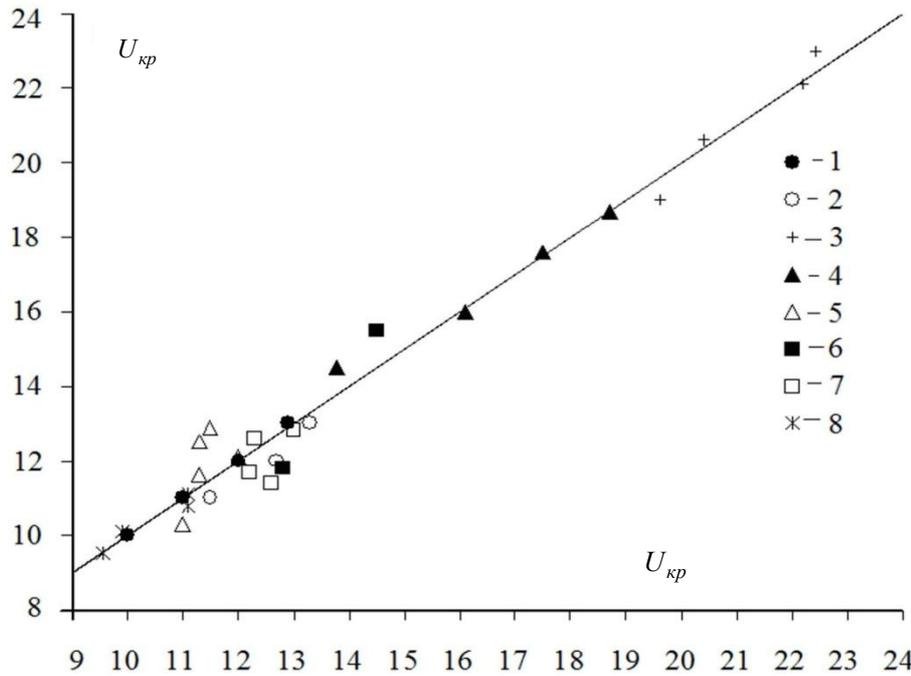


Рисунок 1 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критических скоростей пневмотранспорта: 1 – цемент; 2 – зола; 3 – уголь; 4 – концентрат железной руды; 5 – стуропор; 6 – полистирол; 7 – соя; 8 – отруби

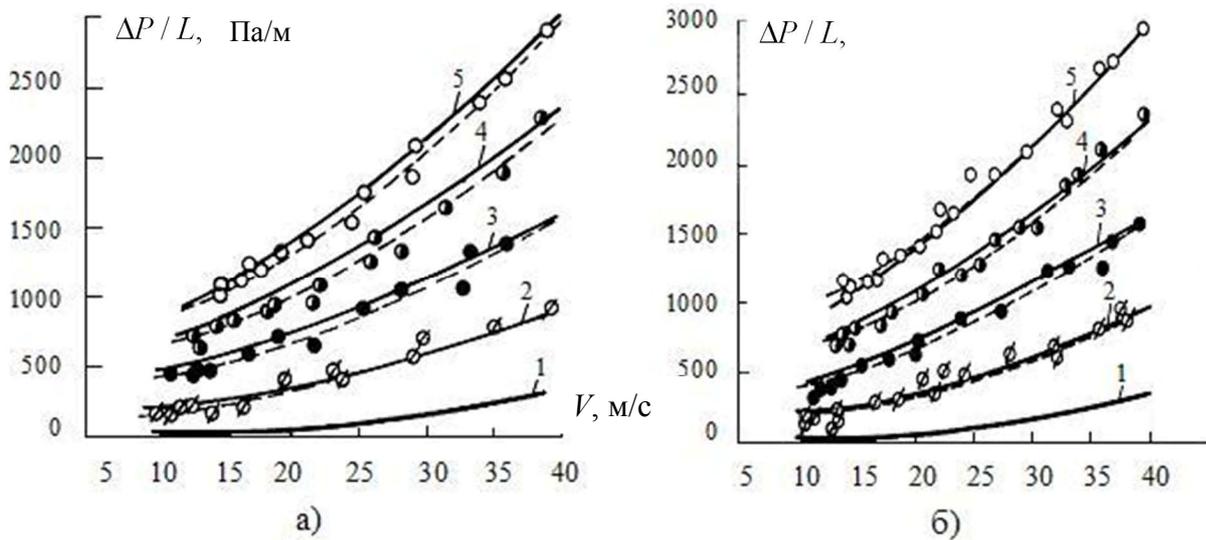


Рисунок 2 – Зависимость $\Delta P_m / L$ от V : а – цемент; б – зола (точки – экспериментальные значения; штриховая линия – осредненные экспериментальные кривые; сплошные линии – расчет): 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 5000$ кг/час; 3 – $G_s = 10000$ кг/час; 4 – $G_s = 15000$ кг/час; 5 – $G_s = 20000$ кг/час

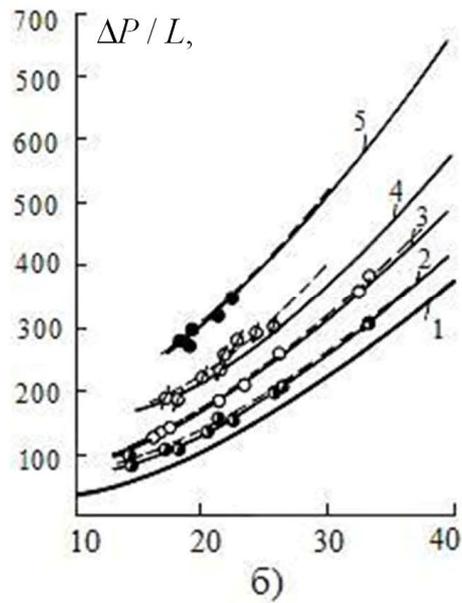
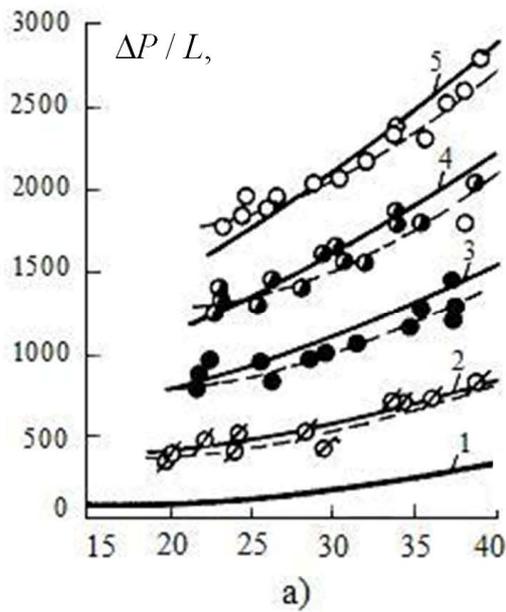


Рисунок 3 – Зависимость $\Delta P_m / L$ от V : а – угольная пыль; б – концентрат железной руды (точки – экспериментальные значения; штриховая линия – осредненные экспериментальные кривые; сплошные линии – расчет):

а: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 5000$ кг/час; 3 – $G_s = 10000$ кг/час; 4 – $G_s = 15000$ кг/час;

5 – $G_s = 20000$ кг/час;

б: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 250$ кг/час; 3 – $G_s = 500$ кг/час; 4 – $G_s = 750$ кг/час;

5 – $G_s = 1350$ кг/час

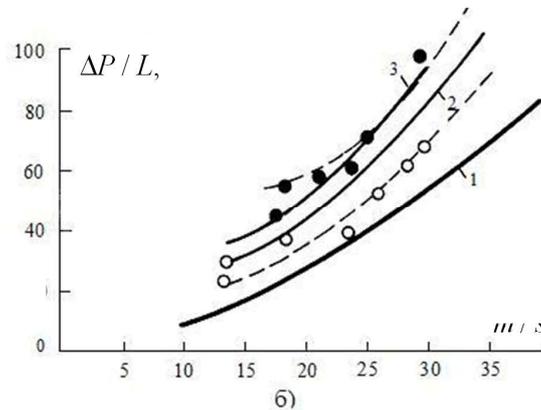
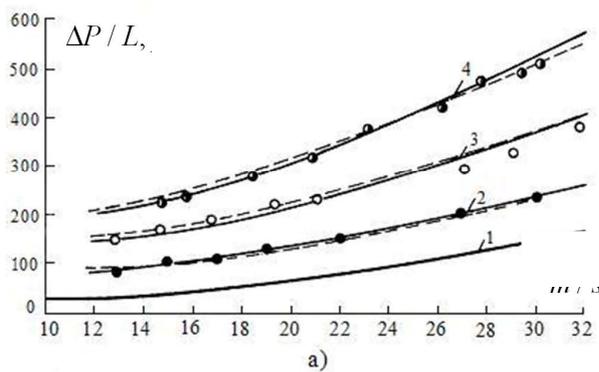


Рисунок 4 – Зависимость $\Delta P_m / L$ от V : а – стурпор; б – полистирол (точки – экспериментальные значения; штриховая линия – осредненные экспериментальные кривые; сплошные линии – расчет):

а: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 251$ кг/час; 3 – $G_s = 743$ кг/час; 4 – $G_s = 1244$ кг/час;

б: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 228$ кг/час; 3 – $G_s = 380$ кг/час

3. ДОСТОВЕРНОСТЬ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ $\Delta P_m / L$ И $U_{кр}$

Для определения достоверности рассматриваемых методик расчета использован экспериментальный материал по измерению параметров $\Delta P_m / L$ и $U_{кр}$, соответствующий широкому диапазону изменения условий пневмотранспортирования. Опытные данные заимствованы в основном из литературных источников. Кроме того, выполнены собственные экспериментальные исследования зависимости $\Delta P_m / L$ от U при пневмотранспорте песка и гравия.

Попутно вкратце опишем лабораторную установку, на которой проведены исследования по пневмотранспорту песка и гравия. Она состояла из горизонтальной стальной трубы длиной 8 м и внутренним диаметром 25,4 мм, пылесоса, расположенного в конце трубы и работающего на всасывание, дозатора сыпучего материала, подаваемого в трубу. Длина рабочего участка трубы, на котором измерялся перепад давления, равнялась 2 м. На концах этого участка трубы были установлены отборники давления, соединенные гибкими шлангами с дифференциальным манометром, рабочей жидкостью которого являлась вода. Для измерения расхода и средней скорости воздуха использовалась труба Вентури, оборудованная дифференциальным манометром, трубки которого были залиты водой. Расход воздуха регулировался шаровым краном, расположенным в конце трубы перед пылесосом. Оба дифференциальных манометра, используемые для измерения перепада давления и средней скорости воздуха, были расположены ниже трубы.

Средняя скорость потока воздуха определялась по формуле

$$U = \mu \frac{\left(\frac{d_0}{D}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_0}{D}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta h_u \cdot \frac{\rho_w}{\rho}}, \quad (35)$$

где μ – тарировочный коэффициент;

d_0 – диаметр горловины трубы Вентури;

Δh_u – перепад высот дифференциального манометра;

ρ_w – плотность воды; для данной трубы Вентури параметр $\left(\frac{d_0}{D}\right)^2 = 0,62$.

Удельный перепад давления на рабочем участке трубы вычислялся по формуле

$$\frac{\Delta P_m}{L} = \frac{\Delta h_p}{L} \cdot g \cdot \rho_w, \quad (36)$$

где Δh_p – разность высот дифференциального манометра.

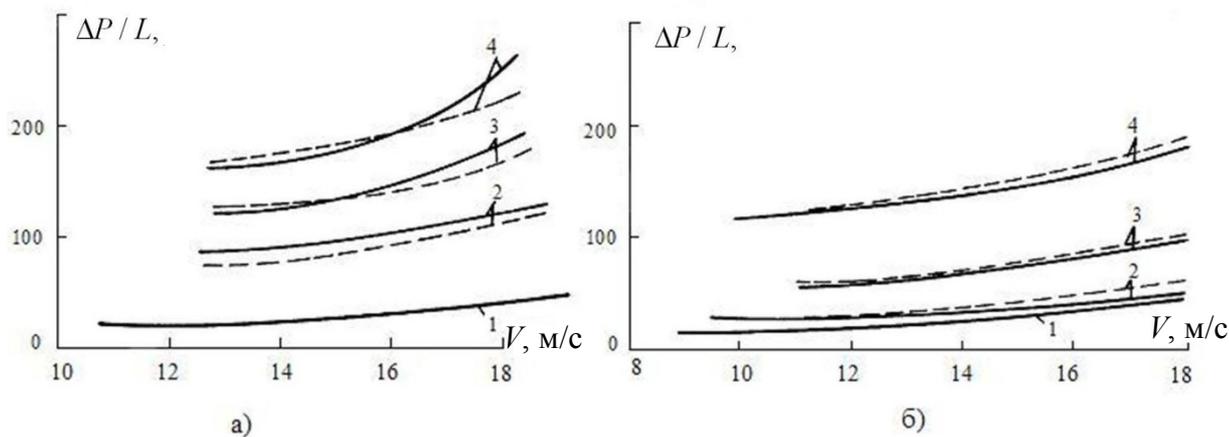


Рисунок 5 – Зависимость $\Delta P_m / L$ от V : а – соя; б – отруби (штриховая линия – экспериментальные кривые; сплошные линии – расчет):

а: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 540$ кг/час; 3 – $G_s = 1080$ кг/час; 4 – $G_s = 1800$ кг/час;

б: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 360$ кг/час; 3 – $G_s = 1440$ кг/час; 4 – $G_s = 3600$ кг/час

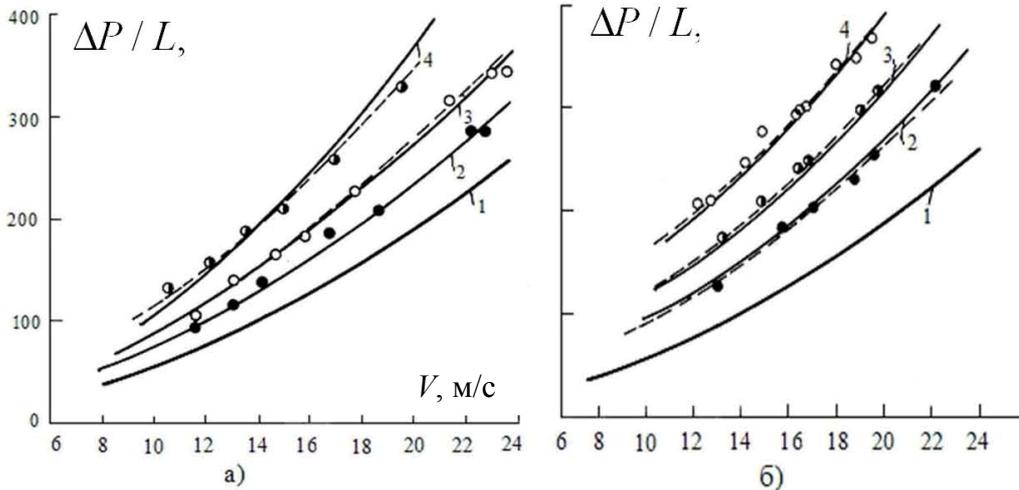


Рисунок 6 – Зависимость $\Delta P_m / L$ от V : а – песок; б – гравий (точки – экспериментальные значения; штриховая линия – осредненные экспериментальные кривые; сплошные линии – расчет):

а: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 25,2$ кг/час; 3 – $G_s = 43,56$ кг/час; 4 – $G_s = 95$ кг/час;

б: 1 – $G_s = 0$ кг/час; 2 – $G_s = 31,9$ кг/час; 3 – $G_s = 54,97$ кг/час; 4 – $G_s = 97,6$ кг/час

Выполнены три серии экспериментов. В первой серии осуществлено гидравлическое испытание трубы с целью определения коэффициента гидравлического трения при движении воздуха в трубе. Для этого включался пылесос, который работал в режиме всасывания. В процессе работы пылесоса одновременно измерялись перепады высот Δh_u и Δh_p , которые соответствовали различным степеням перекрытия живого сечения потока шаровым краном, потом определялись величины U и $\Delta P / L$ по соответствующим формулам (35) и (36). По измеренным значениям вышеуказанных величин вычислялись значения коэффициента гидравлического трения λ . В результате установлено, что в условиях данного эксперимента коэффициент гидравлического трения подчиняется закону

$$\lambda = \frac{0,2122}{\text{Re}^{0,2267}}, \quad (37)$$

где число Рейнольдса $\text{Re} = UD / \nu$; при его определении кинематическая вязкость воздуха принималась равной: $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Таблица 1. Характеристики сыпучих материалов и параметры труб

№ п/п	название материала	d_s , мм	ρ_s , кг/м ³	W_s , см/с	Re_s	G_s , кг/час	D , мм	литер. источн.
мелкодисперсные твердые материалы								
1	цемент	0,021	3060	4,08	0,057	5000–20000	50	[19]
2	зола	0,023	2400	3,84	0,059	5000–20000	50	[19]
3	угольная пыль	0,05	1600	12,1	0,40	5000–20000	50	[19]
4	конц. жел. руды	0,08	4500	49,3	2,63	250–1350	51	[18]

крупнодисперсные твердые материалы								
5	песок	0,37	2650	223	55	25,2–95,1	25,4	–
6	отруби	1	1000	286	190	365–2700	80	[17]
7	гравий	1,23	2700	561	460	31,9–97,6	25,4	–
8	стуропор	2,385	1050	499	793	251–1244	52,6	[13]
9	полистирол	5	595	498	1660	228–380	100	[13]
10	соя	7	1100	677	3162	540–3600	80	[17]

Во второй серии исследований измерялись, при различных степенях перекрытия живого сечения потока шаровым краном, средние скорости движения воздуха и соответствующие им удельные перепады давления при пневмотранспортировании песка с заданными массовыми расходами. Третья серия исследований аналогична второй серии и касается пневмотранспортирования гравия. Во второй и третьей сериях опытов критическая скорость пневмотранспортирования не исследовалась.

Названия, характеристики, массовые расходы некоторых наиболее характерных сыпучих материалов и диаметры труб, используемых в экспериментальных исследованиях пневмотранспорта, а также литературные источники, из которых заимствованы результаты измерений, используемые для проверки достоверности методик расчета параметров $\Delta P_m / L$ и $U_{кр}$, приведены в таблице.

Для возможного сопоставления расчетных значений параметров $\Delta P_m / L$ и $U_{кр}$ с соответствующими экспериментальными значениями этих параметров для каждого конкретного случая определялся, прежде всего, закон гидравлического трения при движении воздуха в трубе, используемой в данном эксперименте. При этом плотность воздуха принята равной $\rho = 1/2 \text{ кг/м}^3$, что соответствует стандартным условиям, т.е. давлению $P = 101,3 \text{ КПа}$ и температуре $T = 293 \text{ К}$ или $t = 20^\circ \text{ С}$. Динамическая вязкость воздуха принята равной $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

При установлении достоверности методик расчета критической скорости эта скорость определялась, с одной стороны, из опытов как скорость, соответствующая минимуму кривой зависимости $\Delta P_m / L$ от U , а с другой стороны – вычислялась по вышеизложенной методике расчета для заданных условий эксперимента.

Результаты сопоставления экспериментальных значений $U_{кр}$ с расчетными показаны на рис. 1. Видно, что все точки вполне удовлетворительно группируются в окрестности биссектрисы координатного угла. Среднее арифметическое относительное отклонение расчетных значений $U_{кр}$ от опытных составляет 3,4 % и находится в пределах точности измерений средней скорости потока, что свидетельствует о достоверности разработанной методики расчета критической скорости пневмотранспорта.

Для определения достоверности методики расчета удельного перепада давления вычислялись значения $\Delta P_m / L$ в критическом и сверхкритическом режимах пневмотранспортирования в диапазоне изменения средних скоростей $U \geq U_{кр}$, соответствующих данному эксперименту. Результаты расчетов в виде сплошных кривых показаны на рисунках 2, а, б.

На этих рисунках точками изображены экспериментальные значения удельных перепадов давления, а штриховыми кривыми – усредненные экспериментальные значения, полученные методом наименьших квадратов. Как следует из этих рисунков, расчетные кривые зависимости $\Delta P_m / L$ от U удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными кривыми в пределах ошибок измерений величины $\Delta P_m / L$. Этим

подтверждается достоверность разработанной методики расчета удельных перепадов давлений в широком диапазоне изменения условий пневмотранспортирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше изложены результаты исследования достоверности разработанных авторами данной статьи методик расчета критических скоростей потока воздуха и удельных потерь давления при пневмотранспорте твердых дисперсных материалов по горизонтальным трубам. Установлено, что в довольно широком диапазоне изменения условий пневмотранспортирования ($0,021 \text{ мм} \leq d_s \leq 7 \text{ мм}$, $1000 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_s \leq 4500 \text{ кг/м}^3$, $25 \text{ кг/час} \leq G_s \leq 20000 \text{ кг/час}$, $25,4 \text{ мм} \leq D \leq 100 \text{ мм}$) средние относительные отклонения расчетных значений параметров $\Delta P_m / L$ и $U_{кр}$ от соответствующих экспериментальных значений находятся в пределах точности измерения этих параметров, что свидетельствует о достаточно высокой степени достоверности разработанных методик расчета.

1. Elghobashi S. A two-equation turbulence model for two-phase flows / S. Elghobashi, T.W. Abou-Arab // *Phys. Fluids*. – 1983. – V. 26, N. 4. – P. 931–938.
2. Chen C.P. Turbulence closure modelling of two-phase flows / C.P. Chen, P.E. Wood // *Chem. Engng. Commun.* – 1984. – V. 29. – P. 931–938.
3. Danon H. Numerical calculations of two-phase turbulent round jet / H. Danon, M. Wolfshtein, G. Hetsroni // *Int. J. Multiphase Flows*. – 1997. – V. 3, N. 3. – P. 223–234.
4. Sommerfeld M. Analysis of collision effect for turbulent gas-particle flow a horizontal channel: part I. Particle transport / M. Sommerfeld // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2003. – V. 29, N. 4. – P. 675–699.
5. Kartushinsky A. Analytical approach for closure equations of gas-solid flows with inter-particle collisions / A. Kartushinsky, E.E. Michaelides // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2004. – V. 30, N. 2. – P. 159–180.
6. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф. Г. Зуев. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
7. Tsuji Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe / Y. Tsuji, Y. Morikawa // *J. Fluid Mech.* – 1982. – V. 120. – P. 385–409.
8. Louge M. Y. The role of particle collisions in pneumatic transport / M. Y. Louge, E. Mastorakos, J. T. Jenkins // *J. Fluid Mech.* – 1991. – V. 231. – P. 345–359.
9. Волошин А. И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А. И. Волошин, Б. В. Пономарев. – К.: Наукова думка, 2001. – 520 с.
10. Гастерштадт И. Пневматический транспорт / И. Гастерштадт. – Л.: Изд-во Сев.-Зап. Обл. Промбюро ВСНЗ, 1927. – 119 с.
11. Шваб В. А. Об основных закономерностях сопротивления в горизонтальных трубах при пневматическом транспорте / В. А. Шваб // *Труды Томского Электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта*. – 1960. – Т. XXIX. – С. 5–32.
12. Вельшоф Г. Пневматический транспорт при высокой концентрации / Г. Вельшоф. – М.: Колос, 1964. – 160 с.
13. Klinzing G. E. Pneumatic conveying of solids / G. E. Klinzing, R. D. Marcus, F. Rizk, L. Leung. – London: Chapman and Hall, 1977. – 599 p.
14. Kramblock W. Apparate fur die pneumatische Forderung / W. Kramblock // *Aufbereitungs-Technic*. – 1982. – V. 23, N. 8. – P. 299–305.
15. Weber M. Friction of the air and the air-solid mixture in pneumatic conveying / M. Weber // *Bulk solids handling*. – 1991. – V. 11. – P. 99–102.
16. Li H. An experimental study of swirling flow pneumatic conveying system in horizontal pipeline / H. Li, Y. Tomita // *Translations of the ASME*. – 1996. – V. 118. – P. 530.
17. Ульяницкий А. В. Обоснование минимальных затрат энергии при горизонтальном пневмотранспортировании сыпучих материалов: дис. канд. тех. наук / А. В. Ульяницкий. – Одесса, 1993. – 121 с.
18. Кузнецов Ю. М. Теоретические основы, принципы конструирования и внедрение устройств для интенсификации процессов производства чугуна и стали путем вдувания в металл порошкообразных материалов: дис. док. тех. наук / Ю. М. Кузнецов. – Свердловск, 1987. – 321 с.

19. Исследовать параметры пневмотранспортных потоков повышенной и средней концентрации // Отчет о НИР. – Автомобильно-дорожный инст-т Дон НТУ: Горловка, 2002. – 128 с.
20. Смолдырев А. Е. Трубопроводный транспорт (основы расчета) / А. Е. Смолдырев. – М.:Недра, 1980. – 293 с.
21. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М.: Стройиздат, 1974. – 327 с.
22. Чальцев М. Н. Гидравлический расчет потоков газозвеси / М. Н. Чальцев, С. И. Криль // Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ. – 2005. – 4 (10). – С. 26–29.
23. Чальцев М. Н. Методика расчета интегральных параметров пневмотранспортирования крупнодисперсных твердых материалов / М. Н. Чальцев, С. И. Криль// Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ. – 2007. – 1 (15). – С. 21–24.
24. Криль С. И. Напорные взвесенесущие потоки / С. И. Криль. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.