

М. Н. Чальцев, канд. тех. наук, С. И. Криль, док. тех. наук

Автомобильно-дорожный институт Донецкого национального технического университета

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПНЕВМОТРАНСПОРТА ПРИ МАЛЫХ ПЕРЕПАДАХ ДАВЛЕНИЯ

Розроблено методику розрахунку параметрів критичного режиму пневмотранспортування при невеликих перепадах тиску. Наведено приклад розрахунку.

Перекачка твердых дисперсных материалов по трубам при помощи потока воздуха широко используется в различных отраслях промышленности. Однако надежность и эффективность работы пневмотранспортных установок во многом зависит от того, какие расчетные значения основных параметров пневмотранспортирования выбираются на стадии проектирования этих установок. Одним из основных параметров пневмотранспортирования является критическая скорость потока воздуха, при которой начинается выпадение твердых частиц на нижнюю стенку горизонтальной трубы, т. е. при которой начинается завал трубопровода. Ясно, что для обеспечения надежности работы пневмотранспортной установки необходима надежная методика прогнозирования критического режима пневмотранспорта.

К настоящему времени известны многие расчетные зависимости для определения критической скорости пневмотранспортирования [1, 2]. Однако они носят эмпирический характер и области применения их ограничены условиями эксперимента. Ограниченность, а в некоторых случаях и недопустимо низкая степень точности этих зависимостей не всегда удовлетворяют современным требованиям проектирования и создания промышленных пневмотранспортных систем.

В настоящей работе предпринята попытка разработать теоретически обоснованную и более достоверную методику расчета критической скорости пневмотранспортирования. Задача состоит в том, чтобы для заданных массового расхода G_S , плотности ρ_S и средней крупности d_S частиц твердого материала, проходного диаметра D и относительной эквивалентной шероховатости δ/D трубопровода определить массовый расход $G_{W,K}$ и среднюю скорость $U_{W,K}$ движения воздуха, соответствующие критическому режиму пневмотранспортирования. При этом речь идет о пневмотранспорте при малых перепадах давления, когда можно пренебречь сжимаемостью воздуха и считать его плотность неизменной по длине трубопровода.

В случае установившегося и непрерывного режима пневмотранспортирования выполняются условия сохранения массовых расходов твердого материала и воздуха:

$$\rho_S S V_S F = G_S; \quad (1)$$

$$\rho_W (1 - S) V_W F = G_W, \quad (2)$$

где S – средняя по перечному сечению трубы объемная концентрация твердых частиц;

ρ_W – плотность воздуха;

V_S и V_W – средние истинные скорости движения твердых частиц и воздуха;

F – площадь поперечного сечения трубы. По определению истинные скорости V_S и V_W равняются:

$$V_S = \frac{Q_S}{SF}; \quad (3)$$

$$V_W = \frac{Q_W}{(1-S)F}, \quad (4)$$

где Q_S и Q_W – объемные расходы твердого материала и воздуха. Если отнести эти расходы ко всей площади F , то получаем средние скорости U_S и U_W движения твердых частиц и газа:

$$U_S = \frac{Q_S}{F}; \quad (5)$$

$$U_W = \frac{Q_W}{F}. \quad (6)$$

Сравнивая (3) и (4) с соответствующими выражениями (5) и (6), находим

$$U_S = SV_S; \quad (7)$$

$$U_W = (1-S)V_W. \quad (8)$$

Поскольку $Q_S + Q_W = Q$, где Q – объемный расход воздуха и твердых частиц, выражения (5) и (6) можно переписать так:

$$U_S = S_p U; \quad (9)$$

$$U_S = (1 - S_p) U, \quad (10)$$

где $S_p = \frac{Q_S}{Q}$ – расходная объемная концентрация твердых частиц;

$U = \frac{Q}{F}$ – средняя скорость движения смеси воздуха и твердых частиц. Исключив из равенств (9) и (10) скорость U , получим

$$U_S = \frac{S_p}{1 - S_p} U_W. \quad (11)$$

С учетом равенств (7) и (11) перепишем формулу (1) в виде

$$\rho_S \frac{S_p}{1 - S_p} U_W F = G_S.$$

Отсюда получаем

$$U_W = \frac{G_S}{\rho_S F} \cdot \frac{1 - S_p}{S_p}. \quad (12)$$

Формула (12) правомочна для средних скоростей воздуха $U_W \geq U_{W,K}$, поэтому в случае критического режима пневмотранспортирования она принимает вид

$$U_{W,K} = \frac{G_S}{\rho_S F} \cdot \frac{1 - S_{p,K}}{S_{p,K}}, \quad (13)$$

где $S_{p,K}$ – расходная объемная концентрация твердых частиц в критическом режиме пневмотранспорта.

Таким образом, для определения значения критической скорости $U_{W,K}$ по формуле (13) необходимо знать величину $S_{p,K}$, которая зависит от концентрации S_K и характеристик

твердого материала. В случае малых перепадов давления, когда воздух можно рассматривать как несжимаемую среду, аэродинамические процессы при пневмотранспорте должны быть качественно сходны с гидродинамическими процессами при гидротранспорте. Поэтому для определения величины $S_{p,K}$, используем формулу, полученную в результате исследования трубопроводного гидротранспорта [3]. Она имеет вид:

$$S_{p,K} = S_K \left[1 - \varphi(\text{Re}_S) \left(1 - \frac{S_K}{S_m} \right)^{2,16} \right]; \quad (14)$$

$$\varphi(\text{Re}_S) = 0,45 \left[1 + \text{sign}f \cdot \text{th} \left(0,967 |f|^{0,6} \right) \right]; \quad (15)$$

$$f = \lg \text{Re}_S - 0,88. \quad (16)$$

Здесь S_K – средняя объемная концентрация, соответствующая критическому режиму;

S_m – предельно возможная объемная концентрация твердых частиц;

$\text{sign}f$ – знак величины f ;

$\text{Re}_S = \frac{W_S d_S}{\nu_w}$ – число Рейнольдса для твердых частиц, где W_S скорость свободного

падения одиночной твердой частицы диаметром d_S в покоящемся воздухе; ν_w – кинематическая вязкость воздуха.

Отметим, что формулы (14)–(16) не являются эмпирическими, а представляют собой аппроксимацию результатов численного расчета расходной концентрации, полученных на основе теоретических исследований полей осредненных концентраций скоростей в турбулентных взвесенесущих потоках. Эта формула проверена на обширном экспериментальном материале по измерению расходной концентрации и характеризуется достаточно высокой степенью достоверности.

Поскольку в (14) входит концентрация S_K , величина которой неизвестна, система уравнений (13) и (14) не позволяет вычислить скорость $U_{W,K}$, поскольку имеем два уравнения и три неизвестные величины $U_{W,K}$, $S_{p,K}$ и S_K . Следовательно, для замыкания системы уравнений (13) и (14) необходимо составить еще одно уравнение, связывающее скорость $U_{W,K}$ с определяющими ее параметрами. Для этого исходим из следующих соображений.

Сложим уравнения (9) и (10), в результате чего будем иметь

$$U_S + U_W = U$$

или

$$U_W = U - U_S. \quad (17)$$

Подставляя в (17) вместо U_S величину $\frac{G_S}{\rho_S F}$, получаем

$$U_W = U - \frac{G_S}{\rho_S F}. \quad (18)$$

Поскольку формула (18) правомочна для скоростей $U_W \geq U_{W,K}$ и $U \geq U_K$, в критическом режиме пневмотранспортирования выполняется равенство

$$U_{W,K} = U_K - \frac{G_S}{\rho_S F}, \quad (19)$$

где U_K – критическая скорость движения смеси воздуха и твердых частиц. Для определения величины U_K используем методику, разработанную для гидротранспорта, адаптировав ее к условиям пневмотранспорта [3]. Упомянутая методика расчета U_K достаточно обоснована и связывает величину U_K с характеристиками потока, твердых частиц и трубопровода. Она учитывает, в частности, неравномерный характер распределения твердых частиц по глубине протока и осевую асимметрию скоростного поля, характерные для критических режимов транспортирования.

Полученное уравнение критического режима гидротранспортирования [3] имеет вид

$$\frac{\rho_{0,K}}{\rho_W} \cdot \frac{\lambda_K}{(1-\alpha_K)\omega_K^2} \cdot \frac{U_K^2}{2qD} = \frac{K_0(\Delta_S - 1)\beta S_m h_K}{1 + \alpha_K}, \quad (20)$$

где $\rho_{0,K}$ – плотность смеси у верхней стенки горизонтальной трубы;

α_K – параметр осевой асимметрии скоростного поля, определяемый как отношение величины Δr , представляющей собой расстояние от кинематической оси потока до геометрической оси трубы, к диаметру D этой трубы;

λ_K – коэффициент гидравлического трения при движении несущей среды в трубе диаметром $D(1-\alpha_K)$;

ω_K – параметр, представляющий собой отношение максимальной осредненной скорости в потоке несущей среды к максимальной осредненной скорости в потоке смеси несущей среды и твердых частиц при одинаковых средних скоростях потоков;

K_0 – коэффициент трения скольжения твердого материала;

$\Delta_S = \frac{\rho_S}{\rho_W}$ – отношение плотности твердых частиц и несущей среды;

β – коэффициент дилатации;

h_K – отношение толщины высококонцентрированного донного слоя твердых частиц к диаметру трубы D .

Поскольку пневмотранспорт характеризуется обычно малыми объемными концентрациями и большими числами Рейнольдса, при которых коэффициент гидравлического трения относится к области квадратичного сопротивления, будем полагать, что $\frac{\rho_{0,K}}{\rho_W} = 1$, $\omega_K = 1$, а λ_K зависит только от относительной шероховатости внутренней стенки трубы, при этом

$$\lambda_K = \frac{\lambda_W}{(1-\alpha_K)^{0,25}}, \quad (21)$$

где λ_W – коэффициент гидравлического трения при движении воздуха в трубе диаметром D , определяемый экспериментально или по формуле Шифринсона

$$\lambda_W = 0,11 \left(\frac{\delta}{D} \right)^{0,25}.$$

Далее предполагается, что для малых объемных концентраций величину h_K можно выразить как

$$h_K = \frac{S_K}{\beta S_m}.$$

С учетом вышеуказанных допущений уравнение (20) принимает упрощенный вид

$$\frac{\lambda_K}{1 - \alpha_K} \cdot \frac{U_K^2}{2qD} = \frac{K_0 (\Delta_S - 1) S_K}{1 + \alpha_K}.$$

Отсюда получаем

$$U_K = \sqrt{qD} \cdot \sqrt{\frac{2K_0 (\Delta_S - 1) S_K}{\lambda_K} \cdot \frac{1 - \alpha_K}{1 + \alpha_K}}. \quad (22)$$

Подставляя в (19) вместо U_K его выражение (22), находим формулу критической скорости $U_{W,K}$:

$$U_{W,K} = \sqrt{qD} \cdot \sqrt{\frac{2K_0 (\Delta_S - 1) S_K}{\lambda_K} \cdot \frac{1 - \alpha_K}{1 + \alpha_K}} - \frac{G_S}{\rho_S F}. \quad (23)$$

Входящий в (23) параметр α_K определяется согласно выражению [3]

$$\alpha_K = 2,44 \sqrt{\frac{Fr_S}{\Delta_S - 1}} \left(0,25 + 0,244 \sqrt{\frac{Fr_S}{\Delta_S - 1}} \right) th \left(0,714 \sqrt{\frac{S_K}{S_m}} \right), \quad (24)$$

где $Fr_S = \frac{W_S^2}{qd_S}$ – число Фруда для частиц твердого материала.

Итак, получено уравнение, замыкающее систему уравнений (13) и (14). Поэтому решение замкнутой системы трех уравнений (13), (14) и (23) позволяет определить три параметра $U_{W,K}$, $S_{p,K}$ и S_K , характеризующие критический режим пневмотранспорта. В этом и заключается предложенная методика расчета критического режима пневмотранспортирования.

Решение системы вышеуказанных уравнений осуществляется графическим способом. Для этого задают значения концентраций $(S_K)_1, (S_K)_2 \dots$ и по формуле (14) определяют соответствующие значения расходной концентрации $(S_{p,K})_1, (S_{p,K})_2 \dots$, после чего вычисляют скорости $(U_{W,K})_1, (U_{W,K})_2 \dots$ в соответствии с формулой (13). По найденным значениям $(U_{W,K})_1, (U_{W,K})_2 \dots$ строят график функции $U_{W,K} = \varphi_1(S_K)$.

Далее для заданных значений концентраций $(S_K)_1, (S_K)_2 \dots$ вычисляют по формуле (23) значения $(U_{W,K})_1, (U_{W,K})_2 \dots$, затем строят график функции $U_{W,K} = \varphi_2(S_K)$. Абсцисса точки пересечения кривых $\varphi_1(S_K)$ и $\varphi_2(S_K)$ дает искомое значение концентрации S_K , а ордината – значение критической скорости $U_{W,K}$. По найденному значению скорости $U_{W,K}$ определяют массовый расход воздуха $G_{W,K} = \rho_W U_{W,K} F$, необходимый для перекачки твердого материала с заданным массовым расходом G_S по трубопроводу диаметром D в критическом режиме пневмотранспортирования.

В качестве примера на рисунке 1 показаны экспериментальные кривые зависимости удельного перепада давления $\frac{\Delta P}{L}$ от средней скорости движения воздуха U_W , заимствованные из [2]. В этих опытах диаметр трубы $D = 0,1$ м, средняя крупность твердых частиц $d_S = 5$ мм, плотность $\rho_S = 595$ кг/м³.

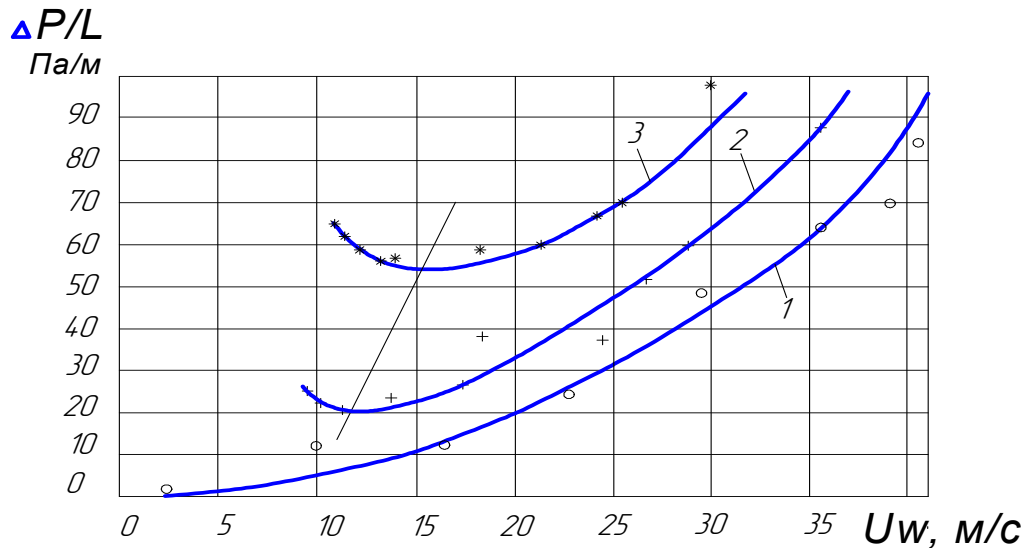


Рисунок 1 – Экспериментальные кривые зависимости величины $\Delta P/L$ от скорости U_w , заимствованные из [2]: 1 – $G_S = 0$; 2 – $G_S = 228$ кг/час; 3 – $G_S = 380$ кг/час

Кривые 1, 2 и 3 соответствуют массовым расходам G_S , равным 0, 228 и 380 кг/час. Прямая линия, пересекающая кривые 2 и 3, соответствует критическим режимам пневмотранспортирования. Согласно этим данным $U_{w,K} = 11,7$ м/с для $G_S = 228$ кг/час и $U_{w,K} = 15$ м/с для $G_S = 380$ кг/час.

Расчет критического режима выполнялся для каждого из массовых расходов $G_S = 228$ кг/час и $G_S = 380$ кг/час. При этом учитывалось, что $W_S = 5,1$ м/с, $K_0 \approx 0,3$, $\lambda_w = 0,01$, $\rho_w = 1,2$ кг/м³, $w = 0,15 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Вычисление функций $\varphi_1(S_K)$ и $\varphi_2(S_K)$ проводилось для значений S_K , равных 0,004; 0,006; 0,008; 0,01. Графики этих функций приведены на рисунке 2.

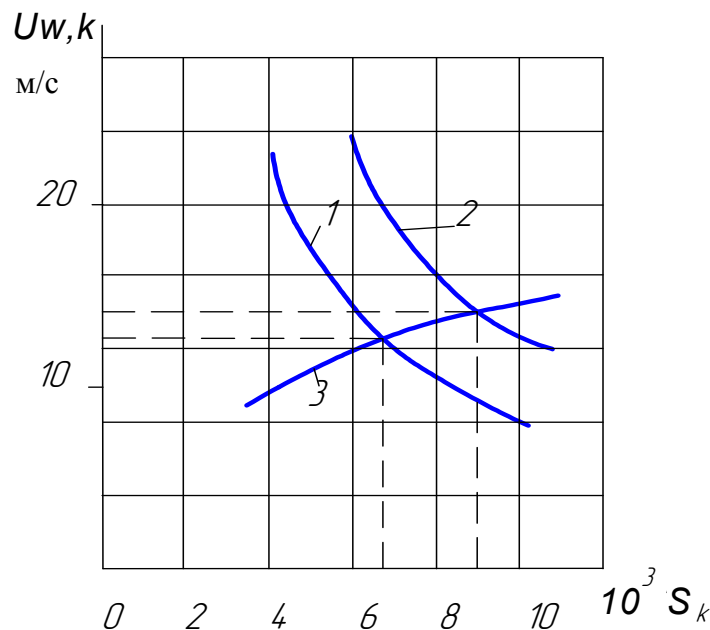


Рисунок 2 – К расчету критических режимов: 1 – $\varphi_1(S_K)$ при $G_S = 228$ кг/ч; 2 – $\varphi_1(S_K)$ при $G_S = 380$ кг/ч; 3 – $\varphi_2(S_K)$

Кривые 1 и 2 относятся к функции $\varphi_1(S_K)$ при $G_S = 228$ кг/час и $G_S = 380$ кг/час соответственно, а кривая 3 – к функции $\varphi_2(S_K)$. По точкам пересечения кривых φ_1 и φ_2 определялись расчетные значения S_K и $U_{W,K}$. В результате получено: $S_K = 0,0067$, $U_{W,K} = 12,2$ м/с, для $G_S = 228$ кг/час и $S_K = 0,009$, $U_{W,K} = 14$ м/с, для $G_S = 380$ кг/час. Как видим, расчетные значения критических скоростей практически совпали с экспериментальными, что может свидетельствовать о достоверности разработанной методики расчета критических режимов пневмотранспортирования. Теперь задача заключается в том, чтобы апробировать эту методику на обширном экспериментальном материале.

Список литературы

1. Смолдырев А. Е. Гидро- и пневмотранспорт / А. Е. Смолдырев. – М.: Metallurgiya, 1975. – 384 с.
Smoldyrev A. Ye. Gidro- i pnevmotransport (Hydraulic and Pneumatic Conveying) / A. Ye. Smoldyrev. – М.: Metallurgiya, 1975. – 384 s.
2. Klinzig G. E. Pneumatic Conveying of Solids / G. E. Klinzig, R. D. Marcus, F. Rizk. – London, 1997. – 599 p.
3. Криль С. И. Напорные взвесенесущие потоки / С. И. Криль. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.
Kril S. I. Napornyye vzvesenesushchiye potoki (Pressure Suspension Flows) / S. I. Kril. – К.: Naukova dumka, 1990.