

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article\_5926a0598b7e58.27665013

Земан Д.А., аспирант,  
Шишкин С.Ф., канд. техн. наук, доц.,  
Шишкин А.С., канд. техн. наук, доц.,  
Бараковских Д.С., инженер

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ ПНЕВМОТРАНСПОРТА

pass-carnag@mail.ru

Приведена схема экспериментальной установки для определения скорости частиц в условиях пневмотранспорта. Использовался метод магнитной метки. Система пневмотранспорта реализована на базе пневмокамерного насоса. Измерение скорости частиц проводилось на прямом участке с установившимся движением. Варьировались режимные параметры двухфазного потока – расход воздуха, концентрация, давление. Опыты проводились на различных сыпучих материалах. Приводится сравнение экспериментальных и расчетных значений относительной скорости частиц по различным известным зависимостям.

**Ключевые слова:** пневмотранспорт, двухфазный поток, расход воздуха, относительная скорость частиц, индикаторная частица.

Как известно, аэродинамическое сопротивление пневмотранспортного тракта складываются из потерь давления на разгон частиц, потерь давления по длине, потерь давления на подъем материала и местных потерь давления. При этом потери давления по длине составляют основную долю. Однако чтобы определить потери давления на длинных участках с установившимся движением необходимо знать относительную скорость движения частиц твердой фазы [1, 2, 3]. Поэтому, вопросу определения относительной скорости частиц посвящено большое количество работ и предложено достаточно большое число различных зависимостей. Так в работах [4, 5] приводится анализ шести зависимостей, предложенных разными авторами. В тоже время работ, посвященных экспериментальному определению скорости частиц в условия пневмотранспорта очень мало. Цели настоящей работы – экспериментальное определение относительной скорости и выбор зависимости для ее расчета.

Схема установки для определения скорости движения частиц в условиях пневмотранспорта приведена на рис. 1. и представляет собой систему высоконапорного пневмотранспорта на базе лабораторного пневмокамерного насоса (ПКН) емкостью 30 литров. Транспортный трубопровод имеет внутренний диаметр 16 мм и длину 25 м. Установка включает в себя: 1 – подвод сжатого воздуха из коллектора; 2 – ПКН; 3 – клапан загрузки материала; 4 – пневмотранспортный тракт; 5 – циклон с накопительным бункером,

для отделения материала от воздуха; 6 – фильтр санитарной очистки; 7 – регулировочные вентили расхода воздуха; 8 – стандартная диафрагма, с импульсными трубками; 9,10,11,12 – импульсные трубки для измерения давления; 13 – измерительный комплекс включающий в себя: аналогово-цифровой преобразователь, пять датчиков давления серии «Метран 100», преобразователь интерфейса; 14 – устройство ввода индикаторной частицы; 15 – индукционные датчики; 16 – аналогово-цифровой преобразователь электромагнитных импульсов с частотой дискретизации 44 кГц; 17 – компьютер для обработки данных; 18 – эжектор.

Длина прямого, горизонтального участка перед индукционными датчиками составляет 437 калибров, это позволяет материалу разогнаться и выйти на установившийся режим движения. Во время установившегося режима движения двухфазного потока вводится индикаторная частица, представляющая собой пенопластовый шарик диаметром 10–12 мм, внутри которого помещена малая магнитная частица. Как показали визуальные наблюдения на стеклянной трубке, такой шарик в условиях пневмотранспорта движется с осредненной скоростью твердой фазы и не может обогнать поток, или отстать от него. Прохождение частицы регистрируется индукционными датчиками, расположенными друг от друга на расстоянии  $l=160$  мм. Сигнал от индукционных датчиков фиксируется быстродействующим аналогово-цифровым пре-

образователем и записывается в файл на компьютере. На рис. 2. представлен временной график

сигналов от индукционных датчиков при пролете индикаторной частицы.

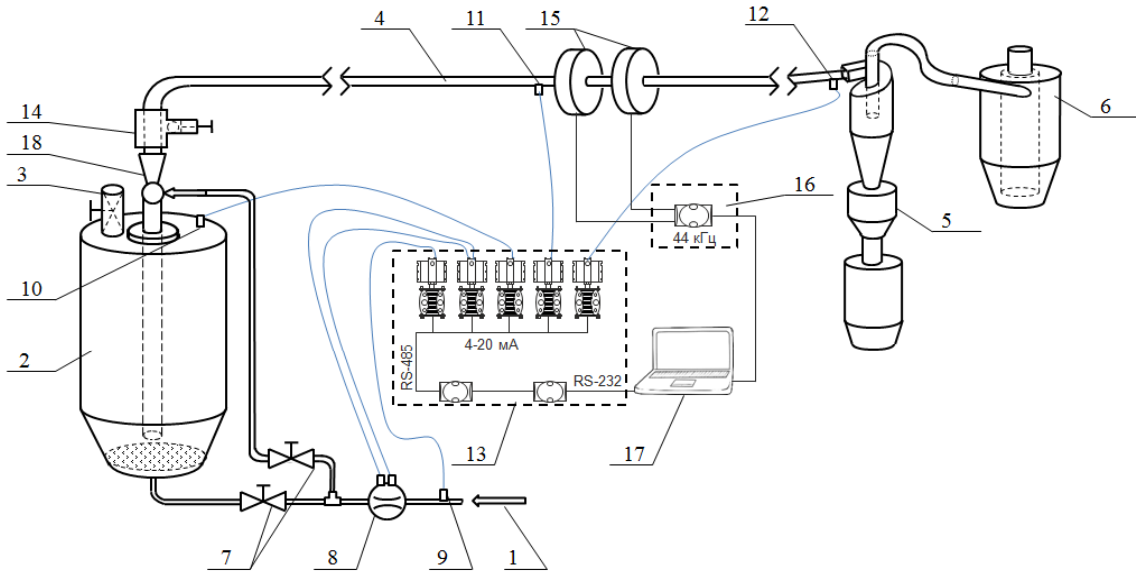


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения относительной скорости частиц

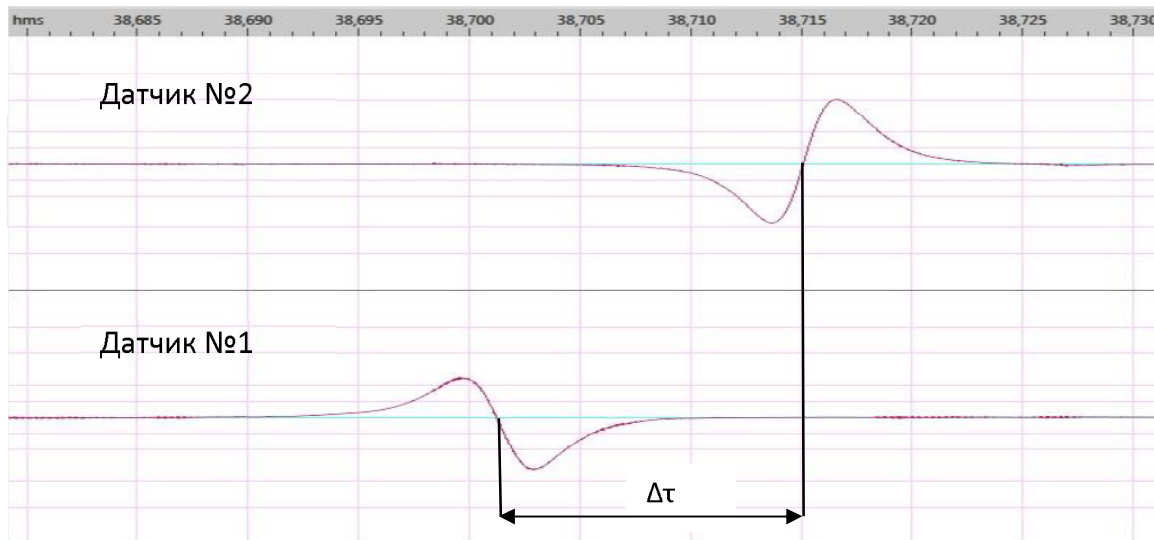


Рис. 2. Треки прохождения магнитной частицы-индикатора через сечение катушек

Измерив, промежуток времени  $\Delta\tau$  между импульсами, можно вычислить скорость движения индикаторной частицы  $U$ , м/с по очевидной зависимости:

$$U = \frac{l}{\Delta\tau} \quad (1)$$

Опыты проводились на двух типах сыпучего материала – монодисперсном и полидисперсном. В качестве монодисперсного материала использовался пропант представляющий собой шарообразные частицы узкой фракции со средневзвешанным диаметром 1243,7 мкм и насыпной плотностью 1940 кг/м<sup>3</sup>. Кажущаяся плотность – 2750 кг/м<sup>3</sup>. Полидисперсный полевой шпат имеет размеры частиц в диапазоне 0-400

мкм, со средневзвешанным диаметром 492,5 мкм. Насыпная плотность равна 1440 кг/м<sup>3</sup>, кажущаяся плотность 2398 кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 1).

Таблица 1

**Гранулометрический состав полевого шпата**

Сита, мкм	R, гр	r, гр
1600	0,3	0,3
1000	3,1	2,8
630	21,1	18
400	57,8	36,7
200	92,7	34,9
160	96	3,3
100	98,8	2,8
63	99,5	0,7
0	100	0,5

Измерив, массовый расход воздуха  $q_m$ , кг/с, по стандартной диафрагме, можно вычислить скорость воздушного потока перед индукционными датчиками  $W_{ид}$ , м/с, по известной зависимости:

$$W_{ид} = \frac{q_m}{\rho_{ид} F_T}, \quad (2)$$

где,  $F_T$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>; плотность воздуха  $\rho_{ид}$ , кг/м<sup>3</sup>, определяем по уравнению состояния:

$$\rho_{ид} = \frac{P_{бар} + P_{ид}}{RT}, \quad (3)$$

где,  $P_{бар}$  – барометрическое давление, Па;  $P_{ид}$  – давление в районе установки индикаторных дат-

чиков, Па;  $R$  – удельная газовая постоянная для воздуха, Дж/(К·кг),  $T$  – абсолютная температура воздуха, К.

Экспериментальное значение относительной скорости  $j_{экс}$  определяется по зависимости:

$$j_{экс} = \frac{U}{W_{ид}}. \quad (4)$$

На рис.3. изображен график изменения скорости в сечениях на трех участках транспортногo трубопровода. Вертикальная линия на графике обозначает момент пролета индикаторной частицы через сечение индукционных датчиков.

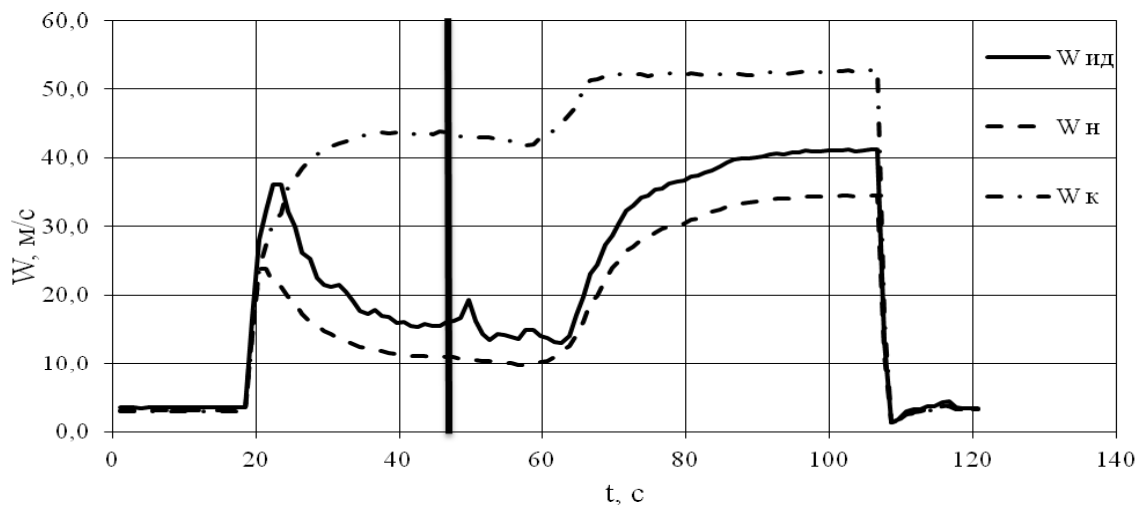


Рис. 3. Изменение скоростей воздушного потока в транспортной трубе на различных участках:

$W_{ид}$  – скорость перед индукционными датчиками;  $W_н$  – скорость в начале тракта;  $W_к$  – скорость в конце тракта

При вычислении расчетных значений относительной скорости частиц использовались следующие формулы.

Зависимость (5) Овена, Разумова [2, 3], где  $v_{ос}$  – скорость осаждения частиц, м/с;  $w$  – средняя по сечению скорость потока, м/с.

$$j = 1 - \frac{v_{ос}}{w}. \quad (5)$$

Зависимость (6) Басова [2], где  $d$  – диаметр частицы, м.

$$j = 1 - 375 \frac{v_{ос}}{w} d^{-0,845}. \quad (6)$$

Зависимость (7) Калугина [6], где  $\zeta_\phi$  – коэффициент сопротивления потока;  $C_x$  – коэффициент сопротивления частицы;  $\mu$  – расходная концентрация твердой фазы, кг/кг;  $\rho_t$ ,  $\rho$  – соответственно плотность частиц и плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – диаметр трубы, м.

$$j = \left( 1 + \frac{\zeta_\phi \rho_t d}{3 C_x \rho \mu D} \right) - \sqrt{\left( 1 + \frac{\zeta_\phi \rho_t d}{3 C_x \rho \mu D} \right)^2 - 1}. \quad (7)$$

Зависимость (8) Шухарта [2], где  $C$  – константа,  $C=0,014 - 0,05$ ;  $Fr$  – критерий Фруда;  $Fr_0$  – критерий Фруда, рассчитанный по скорости потока соответствующей осаждению частиц.

$$j = \left[ 1 + C \left( \frac{\rho_t}{\rho} - 1 \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{d}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \left( 1 + \frac{200}{Fr - Fr_0} \right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

Зависимость (9) Гастерштадта [7].

$$j = 1 - \left( 0,0117 + \frac{0,178}{w} \right) v_{ос}. \quad (9)$$

Формула (10) зональной модели [4], где  $S_1$ ,  $S_2$  – отношение площадей зон к площади сечения трубы.

$$j = \frac{S_1}{S_1 - S_2} - \sqrt{\left( \frac{S_1}{S_1 - S_2} \right)^2 - \frac{S_1}{S_1 - S_2}}. \quad (10)$$

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные данные.

Таблица 2

## Соотношение экспериментальных и расчетных данных

Режимные параметры	Монодисперсный (пропант)					Полидисперсный (шпат)			
Давление $P_c$ , кПа	0,452	0,342	0,353	0,370	0,344	0,437	0,287	0,447	0,456
Концентрация $\mu$ , кг/кг	27,25	22,49	23,27	21,74	22,32	24,51	16,58	24,06	30,15
Скорость $W_{из}$ , м/с	20,41	16,34	15,93	15,93	16,57	11,25	19,34	18,75	21,34
Экспериментальное значение скорости частиц									
Скорость $U$ , м/с	13,14	10,6	9,94	9,94	11,36	10,6	16,74	12,23	12,23
Экспериментальное значение относительной скорости									
Скорость $j_{экс}$	0,644	0,649	0,624	0,624	0,686	0,942	0,865	0,652	0,573
Расчетные значения относительной скорости по различным зависимостям									
Зональная модель	0,933	0,944	0,942	0,943	0,944	0,983	0,984	0,984	0,984
Калугин	0,988	0,988	0,988	0,988	0,988	0,992	0,992	0,992	0,992
Басов	0,715	0,740	0,729	0,732	0,744	0,985	0,986	0,989	0,991
Овен, Разумов	0,687	0,715	0,702	0,706	0,719	0,984	0,985	0,987	0,990
Шухарт	0,591	0,687	0,686	0,690	0,691	0,698	0,677	0,625	0,590
Гастерштадт	0,871	0,895	0,892	0,894	0,896	0,945	0,941	0,931	0,924

Исходя из представленных в табл.1 данных следует, что наиболее близкие значения к экспериментальным данным дают зависимости для расчета относительной скорости (8) Шухарта и (5) Овена и Разумова. Эти зависимости можно использовать как для полидисперсных, так и для монодисперсных составов. Для монодисперсных материалов, также можно использовать зависимость (6) Басова [2].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишкин С.Ф., Шишкин А.С. Движение двухфазного потока в трубе постоянного сечения / Физико-химия и технология оксидно-силикатных материалов: материалы междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 17-19 февр. 2000 г. // Урал. гос. техн. ун-т, Урал. отд-ние Ассоц. строит. вузов РФ. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2000. С. 251.

2. Разумов И. М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 248с.

3. Сукомел А.С., Цветков Ф.Ф., Керимов Р.Р. Теплообмен и гидравлические сопротивления при движении газозвеси в трубах. М.: Энергия, 1977. 192 с.

4. Гаврилюк Д.Н., Шишкин С.Ф. Относительная скорость движения пневмотранспорта на стационарных участках // Вестник БГТУ им. В. Г Шухова. 2009. №3. С. 122–126.

5. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 378 с.

6. Калугин Б.Ф. Потери напора от ударов частиц о стенки при пневматическом транспорте по горизонтальным трубам // Инженерно-физический журнал. 1960. Т. IV. №7. С. 40–46.

7. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.

**Zeman D.A., Shishkin S.F., Shishkin A.S., Barakovskikh D.S.**  
**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE RELATIVE SPEED OF PARTICLES**  
**IN THE CONDITIONS OF PNEUMOTRANSPORT**

*The scheme of the experimental device for the determining of the velocity of particles in pneumatic transport conditions was given.*

*The method of magnetic marking was used.*

*The pneumatic transport system was implemented on the basis of a pneumatic chamber pump. The particle velocity was measured on a straight section with steady motion.*

*The mode parameters of the two-phase flow were varied: air flow, concentration, pressure. The experiments were carried out with various bulk materials. Comparison of the experimental and calculated values of the relative particle velocity was given in respect to various known dependences.*

**Key words:** *pneumatic transport, two-phase flow, air flow, relative particle velocity, indicator particle.*

**Земан Денис Александрович**, аспирант.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт Новых Материалов и Технологий, департамент строительного материаловедения.

Адрес: Россия, Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 28.

E-mail: pass-carnag@mail.ru

, кандидат технических наук, доцент.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт Новых Материалов и Технологий, департамент строительного материаловедения.

Адрес: Россия, Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 28.

E-mail: shsf@planet-a.ru

**Шишкин**, кандидат технических наук, доцент.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт Новых Материалов и Технологий, департамент строительного материаловедения.

Адрес: Россия, Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 28.

E-mail: a.s.shishkin@urfu.ru

**Бараковских Дмитрий Сергеевич**, инженер.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт Новых Материалов и Технологий, департамент строительного материаловедения.

Адрес: Россия, Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 28.

E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru