

**Потапов Валентин Яковлевич**

д-р тех. наук, профессор

**Степаненков Дмитрий Денисович**

магистрант

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

г. Екатеринбург, Свердловская область

## **К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧАСТИЦ, ОБЛАДАЮЩИХ ПАРУСНОСТЬЮ**

***Аннотация:** в работе проведены исследования поведения асбестовых волокон в вертикальном воздушном потоке. Исследования проводились в цилиндрической трубе ротаметрического порционно-парусного классификатора. Исследовались недеформированные волокна антофиллит-асбеста удельного веса 3,0 г/см<sup>2</sup> и хризотил-асбеста удельного веса 2,45 г/см<sup>2</sup>. Замеры скоростей витания волокон различной длины и толщины в цилиндрической трубе позволили установить следующее: в вертикальном потоке воздуха скорость витания асбестовых волокон в пределах соотношения  $L/D = 5 \div 40$  не зависит от длины, а находится в квадратичной зависимости от их диаметра. Полученные данные позволяют считать, что расчет скорости витания волокна необходимо производить через диаметр его. Выведены эмпирические формулы для расчета скорости витания недеформированных волокон антофиллита и хризотила и установлены пределы  $Re$ , в которых формулы справедливы. Полученные аэродинамические характеристики были использованы для расчёта и разработки пневмотранспортных систем мелкодисперсных сыпучих материалов горных пород. Разрабатываемые устройства могут быть также использованы в других отраслях промышленности.*

***Ключевые слова:** асбестовое волокно, скорость витания, воздушный поток, коэффициент сопротивления, поверхность, аэродинамические свойства, диаметр, трение.*

Как известно, чем больше частица отличается по форме от шара, тем меньше скорость ее витания. В последнее время в исследованиях многими авторами уделяется большое внимание изучению влияния формы на скорость витания. С этих позиций представляет интерес исследование поведения асбестового волокна в вертикальном воздушном потоке [2].

При выводе формул скоростей витания различных материалов, имеющих неправильную форму (пластинчатую, продолговатую, кубическую) частицу чаще всего приводят к равновеликому шару с эквивалентным диаметром  $cI_3$ . При этом частица обычно имеет более или менее пропорциональные размеры (длину, ширину, высоту). В таких случаях расхождения в величине скорости витания по расчету и эксперименту находятся в допустимых пределах.

Простая же замена удлиненных цилиндрических частиц равновеликим шаром может привести к значительному искажению расчетной скорости витания [1; 2].

В общем виде скорость витания представлена следующим выражением:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\psi * p * S}} \quad (1)$$

где  $G$  – вес частицы, кг;

$\psi$  – коэффициент воздушного сопротивления;  $p$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь миделева сечения или площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную скорости движения, м<sup>2</sup>.

Из формулы (1) видно, что  $V_s$  находится в обратной зависимости от коэффициента воздушного сопротивления и миделева сечения частицы. В связи с этим исследовано поведение асбестовых волокон в вертикальном воздушном потоке.

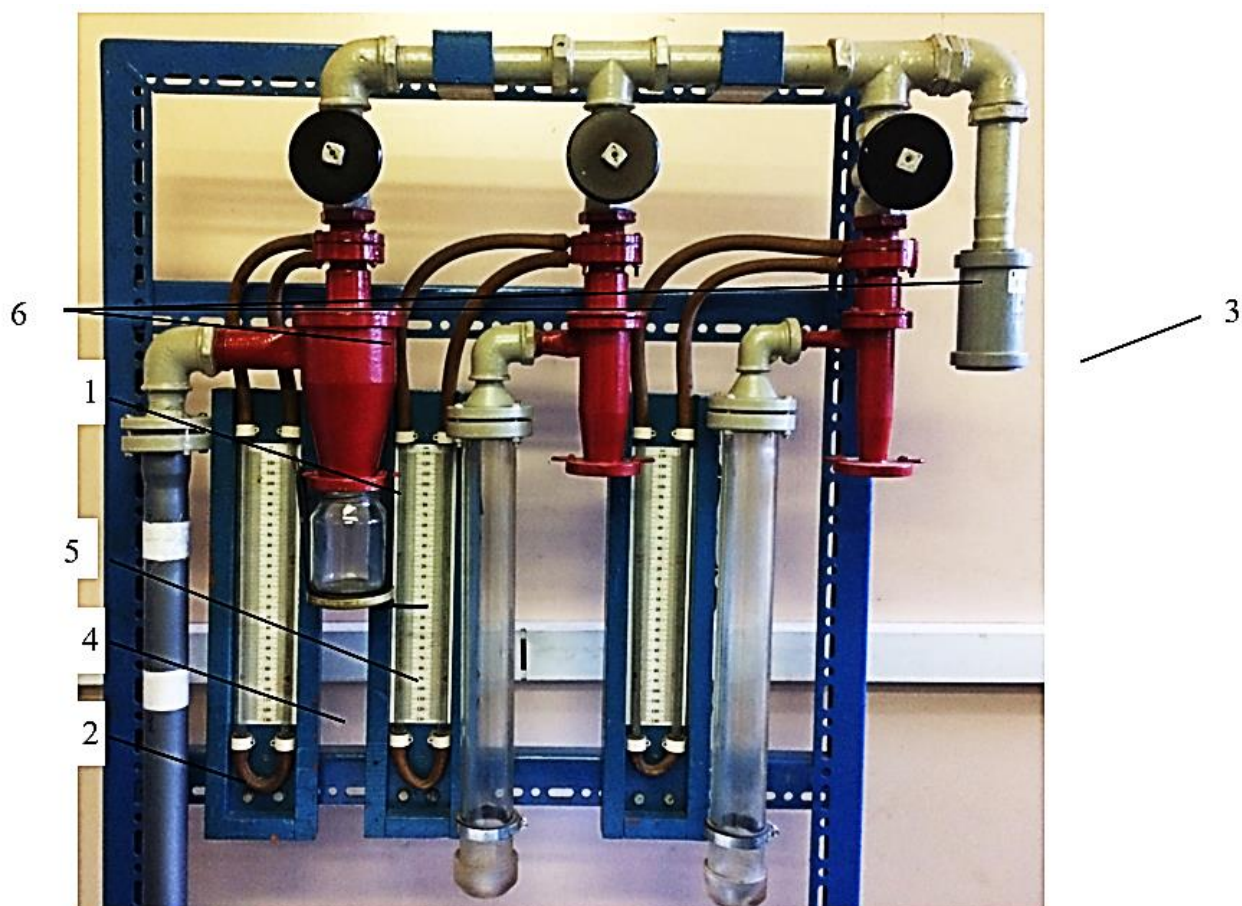


Рис. 1. Пневматический парусно-порционный классификатор  
для замера скоростей витания частиц

Исследования проводились на установке, представленной на рисунке 1 [3; 4].

Классификатор (рис. 1) устроен следующим образом: на стенде закреплены циклоны 1, к которым подведены материалозаборные трубопровод 2, на входной трубе которого установлен вентилятор и разгрузочный 3 трубопровод. Так же к циклонам подведены водяные манометры 4, позволяющие контролировать давление в системе. В кювету 5 разгружаются частицы, обладающие парусностью с разной скоростью витания. Регулятор 6 позволяет изменять сечение трубопровода при поступлении материала в циклон и разгружать частицы, обладающие различной скоростью витания.

Исследуемый материал закладывается в кассету и пронизывается восходящим воздушным потоком от вентилятора.

Классификатор предназначен для изучения аэродинамических свойств мелкодисперстных продуктов [4].

Наблюдения за расположением волокон при их витании показали, что при установившемся движении они ориентируются по отношению к потоку воздуха своим наибольшим сечением, т. е. вектор скорости перпендикулярен образующей цилиндра. Замеры скоростей витания волокон различной длины и толщины в цилиндрической трубе позволили установить следующее: в вертикальном потоке воздуха скорость витания асбестовых волокон в пределах соотношения  $\frac{L}{D} = 5 \div 40$  не зависит от длины (рис. 2), а находится в квадратичной зависимости от их диаметра (рис. 3). Следовательно, миделево сечение асбеста при падении его в воздухе равно миделеву сечению цилиндра  $L \cdot d$ .

Полученные данные позволяют считать, что расчет скорости витания волокна необходимо производить через диаметр его.

В формуле:

$$V_s = 3.0 * \sqrt{d_s * \gamma} \quad (2),$$

выведенной Г.В. Жуковским для волокна хризотил-асбеста [1; 2], не было учтено влияние формы волокна на скорость падения. Волокно приводилось к равновеликому шару, без учета коэффициента воздушного сопротивления от критерия Рейнольдса и не установлены пределы Re, при которых формула – справедлива.

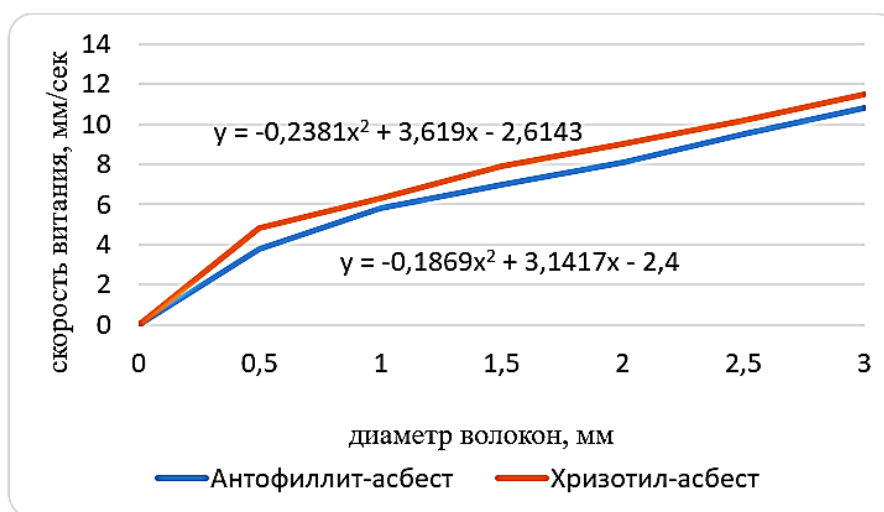


Рис. 3. Зависимость скорости витания асбеста от диаметра волокна

Определение эквивалентного диаметра производится по формуле:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{W}{\pi}} \quad (3),$$

где  $W$  – объем частицы.

Так как форма волокна цилиндрическая, то

$$W = \frac{\pi \cdot d^2}{4} * L \quad (4).$$

Отсюда

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6d^2 * L}{4}} \quad (5),$$

т. е. величина эквивалентного диаметра зависит от длины. Отсюда следует, что при одном и том же диаметре, но разной длине волокон скорость витания будет различна, а это противоречит опытным данным.

Рассмотрим на примере: волокно I –  $L_1 = 7$  мм,  $d = 0,5$  мм / волокно II –  $L_2 = 25$  мм,  $d = 0,5$  мм.

По расчету  $d_{31} = 1,37$  мм,  $d_{32} = 2,12$  мм, тогда скорость витания по формуле (2) будет равна  $V_{s1} = 5,43$  мм/сек и  $V_{s2} = 6,75$  мм/сек. По экспериментальным данным для волокна I скорость витания равна 4,8 мм/сек, для волокна II – 4\*68 мм/сек.

Таким образом, во втором случае расчетная  $V_s$  выше на 40% экспериментальной, что свидетельствует о высокой погрешности расчета  $V_s$  по формуле (2) через эквивалентный диаметр волокна.

Как показали наши исследования, коэффициент сопротивления волокна антофиллит-асбеста изменяется от 0,5 до 1 и выше, чем для хризотил-асбеста (от 0,4 до 0,55) и стремится к постоянству при  $Re > 200$ . Различие в величине не трудно объяснить состоянием поверхности: волокна антофиллит-асбеста как бы наслаиваются одни на другие, создавая неровную, сильно шероховатую поверхность волокнистым агрегатам.

Недеформированные волокна (пешка) хризотил-асбеста обычно прямолинейные, жесткие, обладают гладкой блестящей поверхностью. Соответственно,

сила сопротивления воздуху ниже, чем у антофиллит-асбеста. Для геометрически подобных волокон в пределах  $d=0,2-2,5$  мм величина коэффициента  $\psi$  установлена: для антофиллита – 0,6–0,51; для хризотила – 0,4–0,38 [1; 7; 8; 12].

На основе полученных данных о зависимости скорости витания от диаметра волокна и зависимости коэффициента сопротивления  $\psi$  от  $Re$  представляется возможным определить численную величину коэффициента  $C$  для антофиллитового и хризотилового асбестов.

В формуле  $V_s = C * \sqrt{d * \gamma}$ ,

где:  $C$  – постоянный коэффициент, зависящий от коэффициента  $\psi$  и для цилиндрических частиц равный:

$$C = \sqrt{\frac{\pi}{\psi * p}} \quad (6)$$

В окончательном виде эмпирические формулы скоростей витания асбестового волокна:

$$v_{s \text{ ант}} = 3,3 * \sqrt{d * \gamma}, \text{ м/сек} \quad (7)$$

$$v_{s \text{ хр}} = 3,9 * \sqrt{d * \gamma}, \text{ м/сек} \quad (8)$$

Конечная скорость падения антофиллит-асбеста в воздушной среде ниже, чем хризотил-асбеста при одном и том же диаметре волокна.

Уравнение (8) справедливо в пределах  $Re = 3 * 10^2 \div 1.6 * 10^3$ , а уравнение (7) –  $Re = 1.5 * 10^2 \div 1.8 * 10^3$ .

В результате расчета по уравнениям 7, 8 и числа Рейнольдса получены следующие зависимости для асбестосодержащих руд (рисунок 4).

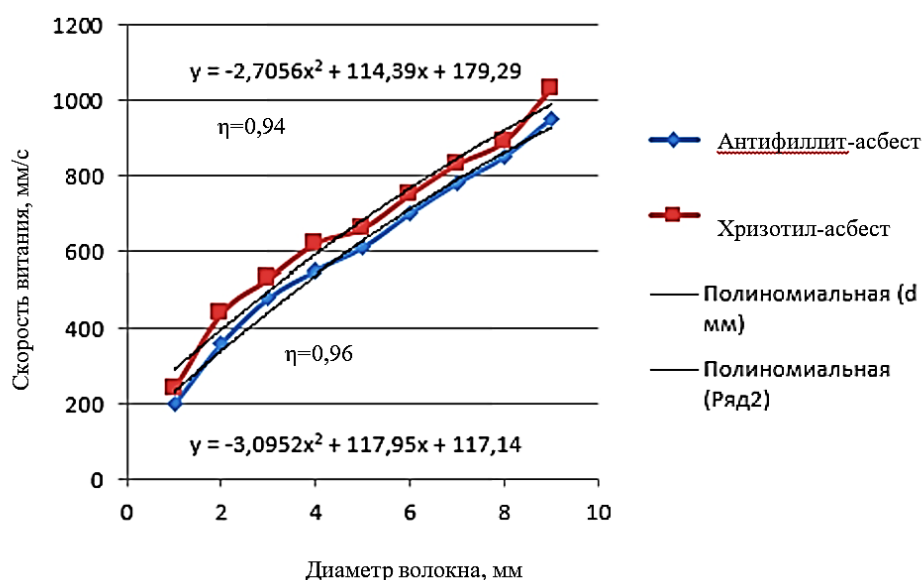


Рис. 4. Зависимости скорости витания асбестового волокна от его диаметра для разного значения числа Рейнольдса

#### Выводы:

1. Экспериментально установлено, что в вертикальном воздушном потоке асбестовое волокно ориентируется по отношению к потоку своим наибольшим сечением, т. е. образующей цилиндра.
2. Скорость витания волокна в воздухе при соотношении длины образующей цилиндра к диаметру  $>5$  не зависит от длины при одном и том же диаметре.
3. Определение скорости витания по эквивалентному диаметру дает значительную погрешность. Более правильно  $V_s$  волокна определять по его диаметру.
4. Коэффициент воздушного сопротивления волокна антофиллит-асбеста, благодаря сильно шероховатой, неровной поверхности, выше, чем у хризотил-асбеста, вследствие чего скорость витания антофиллита ниже.
5. Выведены эмпирические формулы для расчета скорости витания недеформированных волокон (пешка) антофиллита и хризотила и установлены пределы  $Re$ , в которых формулы справедливы.
6. Выведенные формулы рекомендуются для практического использования при расчете пневматических систем [5; 6; 9].

### ***Список литературы***

1. Шалюгина В.А. Исследование скорости витания волокна антофиллит-асбеста в воздушной среде / В.А. Шалюгина, Г.С. Бергер // Новые достижения в технологии обогащения асбестовых руд. Научные труды. – Вып. 13. – Асбест, 1972. С. 122–129.
2. Щедринский М.Б. Обогащение асбестовых руд / М.Б. Щедринский, А.В. Волегов, Э.К. Мюллер. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 234 с.
3. О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдосодержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе / И.М. Келина, Е.Ф. Цыпин, Е.П. Александрова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – №4. – С. 126(129).
4. Александрова Е.П. Анализ закономерностей разделения минералов и выбор оптимальных режимов для полочного воздушного сепаратора / Е.П. Александрова, О.Н. Тихонов // Цветные металлы. – 1986. – №6. – С. 12–17.
5. Урбан Я. Пневматический транспорт / Пер. с чеш.; под ред. Л.М. Шведова. – М.: Машиностроение, 1967. – 256 с.
6. Малевич И.П. Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов / И.П. Малевич, В.С. Серяков, А.В. Мишин. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.
7. Разработка новых способов и технических решений по обработке продуктов обогащения асбестовых руд: Отчет / В.В. Иванов, В.В. Умнова, Е.Ф. Цыпин, В.Я. Потапов; ВНИИпроектасбест. – Асбест, 1989. – 120 с.
8. Поиск и разработка оптимальных схем классификации асбестовых концентратов на основе нового оборудования для повышения экономичности технологических процессов: Отчет / Е.Ф. Цыпин, В.Я. Потапов, А.Е. Пелевин, В.А. Шалюгина; ВНИИпроектасбест. – Асбест, 1992. – 189 с.



9. Двинянов В.В. Движение асбестосодержащих аэросмесей по непрямолинейным участкам пневмотранспорта / В.В. Двинянов, В.М. Сипович // Новые достижения в технологии обогащения асбестовых руд. Научные труды. – Вып. 13. – Асбест, 1972. С. 130–137.
10. Кравец Б.Н. Специальные и комбинированные методы обогащения. – М.: Недра, 1986. – 340 с.
11. Цыпин Е.Ф. Коэффициенты трения частиц асбестосодержащих продуктов / Е.Ф. Цыпин, В.Я. Потапов, А.Е. Пелевин [и др.] // Совершенствование технологии обогащения асбестовых руд: Сб. науч. трудов / ВНИИпроектасбеста. – Асбест, 1990. – С. 110–115.
12. Потапов В.Я. Комбинированная технология предварительного обогащения асбестовых руд: Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 1999. – 208 с.