



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»

Кафедра химической технологии и промышленной экологии

Определение некоторых параметров работы пневмотранспорта

Методические указания к лабораторной работе



Самара 2014

Печатается по решению методического совета нефтетехнологического факультета

УДК 621.54 (076)

ББК 39.79я73

Определение некоторых параметров работы пневмотранспорта:

Метод. указ. / Сост. В.В. Филиппов. – Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 29 с.: ил. 3.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения следующих **направлений бакалавриата:**

- 151000 Технологические машины и оборудование (профиль «Оборудование нефтегазопереработки», по курсу – Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии);
- 240100 Химическая технология (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии);
- 240700 Биотехнология (по курсу – Процессы и аппараты биотехнологии);
- 260100 Продукты питания из растительного сырья (по курсу – Процессы и аппараты пищевых производств);
- 241000 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии);
- **и специалитета:** 240300 Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии).

Рецензент канд. техн. наук *Н.Г. Кац*

На обложке фото установки каталитического крекинга, в которой используется пневмотранспорт катализатора.

© В.В. Филиппов, составление, 2014

© Самарский государственный
технический университет, 2014

Введение

На каждой кухне есть всевозможные крупы – рис, пшено, гречка и т.д. С точки зрения повара – это продукты питания. А с точки зрения инженера-технолога – это **зернистый материал**. Видов зернистых материалов великое множество. Сюда относятся не только продукты сельского хозяйства, но и катализаторы, адсорбенты, различного рода **насадки** и многое другое.

В гидродинамике различают три вида задач.

К **внутренней задаче** относится движение потока жидкости или газа в трубах и каналах. Это основная задача, которую приходится решать инженерам-технологам.

Внешняя задача – это обтекание потоком какого-либо одиночного тела, например, корабля, субмарины или самолёта. Эту задачу решают корабельщики и самолётостроители.

И есть ещё **смешанная задача** – движение потока через каналы, которые образованы одиночными телами. Понятно, что при этом происходит одновременное обтекание потоком этих тел. Вот эту задачу рассмотрим подробнее. Но сначала введём величину, которая характеризует плотность упаковки зернистого материала или, что то же самое, долю пустот между частицами. Для этого используют параметр, который называется **порозностью** или **долей свободного объёма**. Его принято обозначать буквой ε .

Порозностью зернистого материала называют отношение пустот между частицами к объёму, занятому этим материалом

$$\varepsilon = \frac{V_0}{V} = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_c}, \quad (1)$$

где V – общий объём (частицы +пустоты между ними); V_0 – объём пустот; V_c – объём только частиц; ρ_n – насыпная плотность слоя зернистого материала; ρ_c – плотность материала, из которого состоят частицы.

Нетрудно убедиться, что величина порозности ε может меняться от 0 до 1, т.е.

$$0 \leq \varepsilon \leq 1. \quad (1a)$$

Для неподвижных зернистых материалов со сферической формой частиц порозность ε обычно лежит в пределах 0,35-0,45. Если слой монолитный, т.е. не содержит пустот, то порозность равна нулю. Если же частиц в объёме очень мало, преобладает газ, то $\varepsilon \rightarrow 1$.

Теперь сделаем мысленный эксперимент. Поместим слой частиц одинакового размера частиц (не более нескольких миллиметров) в цилиндрический аппарат на сетку. Поток газа можно пустить сверху вниз, т.е. в направлении силы тяжести. Ничего интересного здесь не произойдёт. Изменим направление потока и пустим газ снизу – против сил тяжести. На каждую частицу, находящуюся в неподвижном слое, действуют четыре силы:

1. сила тяжести, направленная вниз;
2. выталкивающая (архимедова) сила, направленная вверх и имеющая очень небольшое значение, ею в расчётах можно пренебречь;
3. сила гидродинамического воздействия газового потока, направленная вверх;
4. сила сцепления одиночной частицы с соседними частицами.

Первые две силы – тяжести и архимедова – не зависят от скорости потока. Третья же сила – гидродинамическая – увеличивается по мере увеличения скорости газа. Поэтому при достижении некоторой скорости сила гидродинамического воздействия станет равной силе тяжести и «победит» силу сцепления с соседними частицами. Происходит качественное изменение ситуации: частички оказываются поднятыми потоком газа, взвешенными в нём. Слой частиц становится похож на кипящую жидкость. Поэтому такое состояние называют **псевдоожигением** или **кипящим** слоем.

В состоянии псевдоожигения существенно увеличивается поверхность контакта твёрдой и газовой фаз. Следовательно, скорость и эффективность многих процессов многократно увеличивается. Поэтому кипящие слои широко применяются в промышленности: сушка зернистых материалов (например, зёрен кофе), каталитические процессы (каталитический крекинг в нефтепереработке), горение твёрдого топлива в топках с кипящим слоем и многие

другие технологии. А свободный полёт человека в аэродинамической трубе – чем не режим псевдооживления?

Для реализации всех этих процессов необходимо знать скорость газового потока, при которой частицы перейдут в псевдооживленное состояние. Эту скорость называют **скоростью начала псевдооживления** или **критической скоростью** $w_{кр}$. Её нахождение – важная инженерная задача. Как она решается – рассмотрено в данной лабораторной работе.

Если продолжать увеличивать скорость газа (назовём её **рабочей скоростью** и обозначим w_p), то сначала ничего качественно нового не происходит – только увеличивается расстояние между частицами кипящего слоя и, следовательно, его объём. Но бесконечно так продолжаться не может. По мере увеличения скорости газа гидродинамическое воздействие на частицы возрастает. Порозность слоя увеличивается и достигает значений $\varepsilon = 0,9 - 0,95$. Это означает, что частицы находятся друг от друга довольно далеко. При достижении некоторой скорости ситуация меняется – начинается **унос частиц** или **пневмотранспорт**. Эту скорость называют **скоростью уноса** или **скоростью витания** $w_{ун}$.

Пневмотранспорт довольно широко используется в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства для перемещения сыпучих (зернистых) материалов. И в быту мы с ним тоже встречаемся: обычный домашний пылесос – не что иное, как

устройство для пневмотранспорта мелких частичек пыли с очищаемой поверхности в пылесборник.

Итак, мы выяснили, что может происходить с зернистым материалом при движении через него потока газа в направлении против сил тяжести. Понятно, что для поддержания частиц навесу или для их транспорта требуется энергия. Поэтому при проектировании установок с кипящим слоем или с пневмотранспортом перед инженером появляются задачи рассчитать затраты энергии на реализацию процесса и определить скорости газа $w_{кр}$ и $w_{ун}$, при которых начинаются эти режимы.

Рассмотрим изменение сопротивления слоя зернистого материала, которое нужно преодолевать потоку газа. Из простого жизненного опыта мы знаем, что если насыпать в какой-либо сосуд зернистый материал (например, зёрна риса) и слегка постучать по стенке, то объём уменьшится. Это значит, что уменьшается порозность слоя или доля свободного объёма. В результате такого воздействия упаковка частиц становится более плотной, а сцепление частиц друг с другом увеличилось. Если же через этот слой начать подавать газ, то перед тем, как перевести частицы в режим псевдооживления, придётся эти силы сцепления между ними разорвать. График зависимости сопротивления слоя зернистого материала от скорости газа принято изображать в логарифмических координатах – так он получается более понятным (рис. 1).

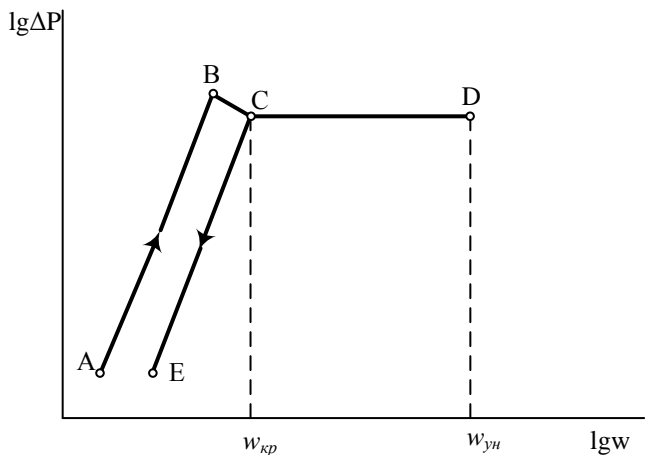


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления слоя зернистого материала от скорости потока газа

Участок АВ соответствует началу эксперимента – мы увеличиваем расход газа через неподвижный слой зернистого материала. При достижении скорости, соответствующей точке В на графике, газ преодолевает силы сцепления между частицами, разрывает их. Частицы как бы отрываются друг от друга, т. е. немного увеличивается порозность слоя. Разрыву сил сцепления между частицами соответствует линия ВС. При достижении скорости газа $w_{кр}$ (точка С) слой переходит в псевдооживленное состояние, начинается свободное витание частиц. Порозность при этом резко увеличивается. Гидравлическое сопротивление слоя становится равным весу частиц G_c , отнесённому к площади сечения аппарата F

$$\Delta P = \frac{G_c}{F}. \quad (2)$$

В этом состоянии слой приобретает текучесть, его частицы интенсивно перемещаются во всех направлениях. Мы получили псевдооживленное (кипящее) состояние слоя зернистого материала.

При дальнейшем увеличении скорости газа частицы перемещаются интенсивнее, порозность и высота кипящего слоя увеличиваются (линия CD). Гидравлическое сопротивление при этом не меняется – газ по прежнему поддерживает частицы навесу. Такое состояние сохраняется до точки D. В точке D скорость газа достигает второй критической величины w_{yn} , псевдооживленный слой разрушается, начинается унос частиц, т.е. режим пневмотранспорта. В этом состоянии порозность слоя ε становится так велика, что движение каждой отдельной частицы **не зависит** от присутствия других частиц. В этом состоянии можно считать, что $\varepsilon \rightarrow 1$.

Интересно отметить, что при снижении скорости газа w_p сопротивление слоя будет меняться не по линии DCBA, а по линии DCE. В точке C частицы слоя лягут так, как им «нравится», более свободно, чем до начала опыта. Порозность зернистого материала при этом станет несколько больше. Но такое явление наблюдается только один раз. При повторении опытов изменение сопротивления всегда будет идти только по линии ECD как в прямом, так и в обратном направлении.

Для количественной характеристики интенсивности «кипения» частиц зернистого материала вводится **число псевдооживления** K , которое показывает отношение рабочей скорости газа w_p к скорости псевдооживления $w_{кр}$

$$K = \frac{w_p}{w_{кр}}. \quad (3)$$

Опытным путём установлено, что вполне достаточное псевдооживление наблюдается уже при значениях $K = 2$. Оптимальное же значение K устанавливается обычно практически для каждого конкретного технологического процесса.

Наиболее надёжно скорость начала псевдооживления $w_{кр}$ определяют экспериментально на лабораторных установках, измеряя сопротивление слоя в зависимости от скорости. Теоретически же эту скорость можно вычислить из критериального уравнения

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (4)$$

где $Re_{кр}$ – значение критерия Рейнольдса, соответствующее началу псевдооживления

$$Re_{кр} = \frac{w_{кр} d\rho_z}{\mu_z}, \quad (5)$$

d – эквивалентный диаметр частицы; ρ_2 – плотность газа; μ_2 – динамический коэффициент вязкости газа; Ar – критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 \rho_2^2 g}{\mu_2^2} \cdot \frac{\rho_4 - \rho_2}{\rho_2}, \quad (6)$$

ρ_4 – плотность материала частицы; g – ускорение свободного падения.

Зная плотность газа ρ_2 и его вязкость μ_2 , размер гранул (для шара эквивалентный диаметр равен диаметру этого шара) и их плотность ρ_4 , по уравнению (6) находится значение критерия Архимеда Ar , а затем по соотношению (4) величина критерия Рейнольдса $Re_{кр}$. Теперь нетрудно по формуле (5) найти критическое значение скорости $w_{кр}$.

Для расчёта скорости уноса (витания) $w_{ун}$ используется критериальное уравнение¹

$$Re_{ун} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (7)$$

¹ Вообще-то уравнения (4) и (7) – это одно и то же уравнение, но с разными коэффициентами и используемые для разных диапазонов значения порозности ϵ .

где $Re_{ун}$ – значение критерия Рейнольдса, при котором начинается унос частиц.

Порядок расчёта точно такой же, как и в случае вычисления критической скорости $w_{кр}$.

Порозность (долю свободного объёма) ε псевдооживленного слоя можно вычислить по соотношению

$$\varepsilon = \left[\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right]^{0,21}. \quad (8)$$

Затраты энергии на пневмотранспорт можно оценить по величине потери давления (напора)² в пневмостволе. Путём простых рассуждений можно прийти к выводу, что эти потери складываются из следующих слагаемых.

1. Статический напор, равный весу твёрдых частиц и воздуха в пневмостволе

$$\Delta P_{cm} = Hg[(1 - \varepsilon) \cdot \rho_c + \varepsilon \rho_z], \quad (9)$$

² Напор и давление – понятия взаимосвязанные. Найдя одну величину, легко найти вторую. Поэтому в литературе часто эти термины встречаются вместе, заменяя один другого. Хотя измеряются они в совершенно разных единицах.

где H – высота (длина) пневмоствола. Так как плотность газа во много раз меньше плотности материала частицы $\rho_2 \ll \rho_4$, то формула (9) упрощается

$$\Delta P_{cm} = Hg(1 - \varepsilon)\rho_4. \quad (10)$$

2. Потеря напора на трение газа о стенки пневмоствола

$$\Delta P_1 = \lambda_1 \frac{H}{d_c} \cdot \frac{w_p^2 \rho_2}{2}, \quad (11)$$

где λ_1 – коэффициент гидравлического сопротивления; d_c – диаметр пневмоствола, w_p – рабочая скорость газа.

3. Потеря напора на трение частиц о стенки пневмоствола

$$\Delta P_2 = \lambda_2 \frac{H}{d_c} \cdot \frac{w_4^2 \rho_4}{2} (1 - \varepsilon), \quad (12)$$

где w_4 – скорость частиц в пневмостволе, находится как разность между рабочей скоростью воздуха w_p и критической скорости $w_{кр}$; λ_2 – коэффициент трения частиц о стенки пневмоствола, $\lambda_2 \approx 0,05$.

4. Потеря давления на разгон частиц определяется из выражения

$$\Delta P_3 = \frac{4G_q w_q}{\pi d_c g}, \quad (13)$$

где G_q – массовый расход транспортируемых частиц.

Таким образом, общая потеря давления в пневмостволе равна

$$\Delta P = \Delta P_{cm} + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3. \quad (14)$$

В большинстве случаев основную часть сопротивления составляет величина ΔP_{cm} .

1. Цель лабораторной работы

Работа предусматривает выполнение двух этапов.

Первый этап – изучение режима псевдооживления. Цели этого этапа:

1. визуальное наблюдение за кипящим слоем зернистого материала;
2. измерение расхода воздуха в режиме псевдооживления;
3. определение рабочей скорости в режиме псевдооживления w_p ;
4. расчёт критической скорости $w_{кр}$ из соотношения (5);
5. определение числа псевдооживления K по уравнению (3).

Второй этап – изучение режима пневмотранспорта частиц.

Целями этого этапа являются:

1. определение расхода воздуха, при котором начинается пневмотранспорт;
2. вычисление экспериментальной скорости уноса $w_{ун.э}$ сравнение её с теоретическим значением $w_{ун.т}$, определённым из соотношения (7);
3. определение производительности установки в режиме пневмотранспорта;
4. экспериментальное определение потери напора в пневмостволе;
5. расчёт потери напора в пневмостволе по уравнению (14).

2. Описание лабораторной установки

Схема установки приведена на рис. 2. Необходимый для работы сжатый воздух создаётся поршневым компрессором и подаётся в ресивер³ (на рис. 2 они не показаны). На воздушной магистрали установлен предохранительный клапан, который срабатывает при достижении давления 0,3 МПа (3 кгс/см²). При этом раздаётся характерное шипение – это воздух выходит в помещение лаборатории. Далее по трубопроводу сжатый воздух поступает на установку. В качестве зернистого материала в работе используются разноцветные гранулы полиэтилена диаметром примерно 3,5 мм.

³ Ресивер (от англ. *receive* — получать, принимать, вмещать) – сосуд для накопления газа или пара.

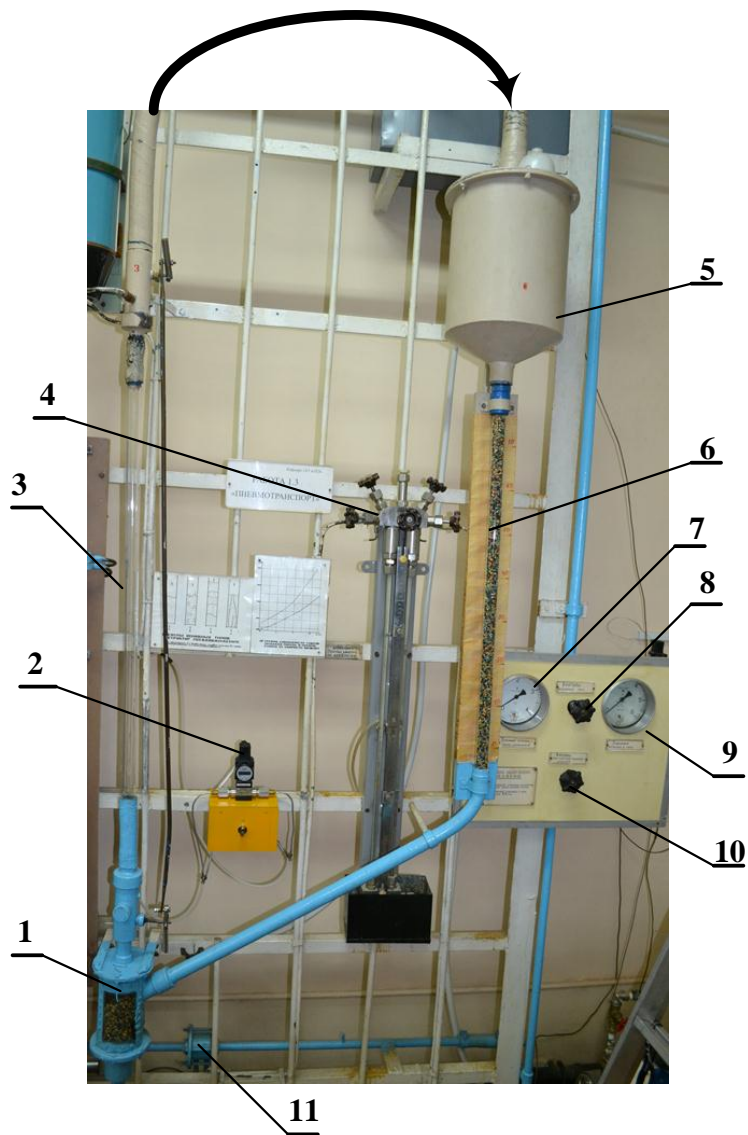


Рис. 2. Схема лабораторной установки. 1 – дозатор; 2 – цифровой дифференциальный манометр; 3 – пневмоствол; 4 – ртутный дифференциальный манометр; 5 – бункер-сепаратор; 6 – загрузочная труба; 7, 9 – манометры; 8, 10 – вентили; 11 – мерная диафрагма.

Основным элементом установки является пневмоствол 3, представляющий собой стеклянную трубу высотой $H = 1,47$ м. При движении воздуха через пневмоствол происходит потеря его напора, которая измеряется цифровым дифференциальным манометром 2. Для подачи зернистого материала в пневмоствол служит дозатор 1. Прошедшие пневмоствол частицы зернистого материала попадают в бункер-сепаратор 5. Здесь происходит их отделение от воздуха, который сбрасывается в помещение лаборатории. Гранулы полиэтилена из бункера-сепаратора попадают в загрузочную трубу 6, по которой они спускаются в дозатор 1 – цикл замыкается.

Давление воздуха на входе в установку (т.е. в ресивере) измеряется манометром 9. На стенде установлено два вентиля – 8 и 10. При открытии вентиля 8 воздух поступает на вход установки. Этот вентиль, как правило, постоянно открыт. Для управления расходом воздуха предназначен вентиль 10. Манометр 7 показывает давление транспортирующего газа перед диафрагмой. Далее воздух проходит мерную диафрагму 11. Перепад давления на ней измеряется с помощью ртутного дифференциального манометра 4. Показания этих двух приборов – манометра 7 и дифманометра 4 – позволяют рассчитать объёмный расход газа в пневмостволе и его скорость. Для вычисления расхода воздуха нужен коэффициент диафрагмы C , который находится по графику, приведённому на рис. 3. Кроме того, значение коэффициента C можно найти по уравнению

$$C = 6 \cdot 10^{-7} \Delta P + 0,0004, \quad (15)$$

где ΔP – перепад давления на диафрагме, мм рт. ст.

Вдоль загрузочной трубы 6 закреплена миллиметровая бумага. Используя секундомер, с её помощью можно определить расход зернистого материала в режиме пневмотранспорта.

Параметры лабораторной установки:

- внутренний диаметр пневмоствола $d_c = 0,026$ мм;
- высота пневмоствола $H = 1,47$ м;
- диаметр загрузочной трубы $d = 0,026$ м;
- площадь сечения пневмоствола $F = 5,34 \cdot 10^{-4}$ м²;
- плотность гранул полиэтилена $\rho_u = 940 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- насыпная плотность полиэтилена $\rho_{нас} = 558 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- эквивалентный диаметр частиц $d = 0,0035$ м;
- плотность воздуха при нормальных условиях
 $\rho_2 = 1,293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- динамический коэффициент вязкости воздуха
 $\mu_2 = 18,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

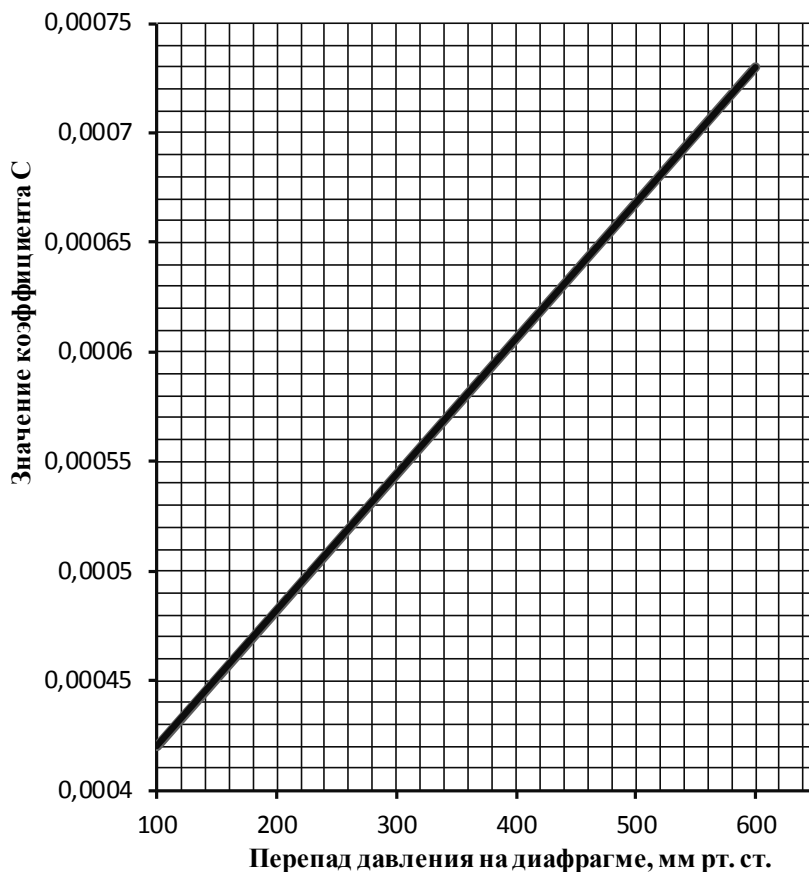


Рис. 3. График для нахождения коэффициента C диафрагмы

3. Последовательность выполнения работы

Первый этап.

1. Запустить компрессор нажатием кнопки на стене. В системе начнёт повышаться давление, следить за которым следует по манометру 9. При достижении давления 2,5 ат компрессор необходимо отключить – набранного в ресивер воздуха хватит для проведения эксперимента.

2. Плавно открывая вентиль 10, подать воздуха на установку. Манометр 7 начнёт показывать повышение давления перед мерной диафрагмой. Перевести частицы зернистого материала в режим псевдооживления. Записать показания манометра 7 и дифференциального ртутного манометра 4. Эти данные будут нужны для определения расхода воздуха и его рабочей скорости в пневмостволе w_p .

Второй этап.

1. Снова пустить компрессор и набрать давление в ресивере. Плавно открывая вентиль 10, перевести частицы полиэтилена в режим пневмотранспорта.

2. Записать показания манометра 7 и дифманометра 4.

3. Измерить потерю давления в пневмостволе с помощью цифрового дифференциального манометра 2.

4. Определить расход гранул полиэтилена. Для этого заметить любую гранулу в начале загрузочной трубы 6, включить секундомер и замерить время τ перемещения этой частицы от верхней отметки до нижней. Зная время перемещения частицы, расстояние между отметками H и диаметр трубы, мы сможем найти расход полиэтилена.

5. С помощью вентиля 10 изменить расход воздуха, подаваемого в пневмоствол, и повторить измерения.

6. Результаты эксперимента занести в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№	Показания манометра 7	Показания дифманометра 4, ΔP	Коэффициент C диафрагмы	Показания цифрового дифманометра 2	Время транспорта, с	Температура в лаборатории и атмосферное давление

4. Обработка результатов эксперимента

Первый этап. Вычисление экспериментального значения скорости псевдооживления (витания) и сравнение его с рассчитанным теоретически. Начнём с результатов эксперимента.

1. По значениям давления перед диафрагмой (манометр 7) и перепада давления на ней ΔP (дифманометр 4), вычислить объёмный расход воздуха, подаваемого на установку в режиме псевдооживления. Для этого используем уравнение⁴

$$V_2 = C \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot T}{P_{abc}}}, \quad (16)$$

где V_2 – объёмный расход воздуха, м³/с; C – эмпирический коэффициент диафрагмы, определяется по графику (рис. 3) или уравнению (15), ΔP – перепад давления на диафрагме, Па; P_{abc} – абсолютное давление перед диафрагмой, Па, равно сумме значений атмосферного давления и избыточного давления перед диафрагмой (показания манометра 7); T – абсолютная температура воздуха, принимаем равной абсолютной температуре в лаборатории, К.

2. Находим величину **рабочей скорости** воздуха в пневмостволе, при которой частицы в нашем эксперименте перешли в псевдооживленное состояние

$$w_p = \frac{V_2}{F}, \quad (17)$$

⁴ Все расчёты следует выполнять только в системе СИ: 1 мм рт. ст = 133,3 Па; - 1 ат = 1 кгс/см² = 98100 Па.

где F – площадь сечения пневмоствола, $F = 5,34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Теперь вычислим **критическую скорость** воздуха $w_{кр}$ (с. 6).

3. По формуле (6) определим величину критерия Архимеда. Необходимые для расчёта величины приведены в конце главы 2 (с. 18).

4. Вычислим по критериальному уравнению (4) величину критерия Рейнольдса $Re_{кр}$.

5. Находим значение критической скорости (скорости начала псевдооживления) $w_{кр}$

$$w_{кр} = \frac{Re_{кр} \mu_2}{d \cdot \rho_2}. \quad (18)$$

6. Теперь оценим, насколько при проведении эксперимента мы превысили критическую скорость, т.е. насколько наша рабочая скорость w_p больше критической скорости $w_{кр}$. Для этого по формуле (3) вычислим число псевдооживления K . Делаем вывод.

Обработка результатов эксперимента второго этапа.

1. По формуле (16) вычисляем расход воздуха в режиме пневмотранспорта.

8. По формуле (17) вычисляем скорость воздуха в пневмостволе $w_{ун}$.

9. Определим объёмный расход гранул полиэтилена $V_{нэ}$ в режиме пневмотранспорта по формуле

$$V_{нэ} = \frac{\pi d^2}{4\tau} H_{загр}. \quad (19)$$

где d – диаметр загрузочной трубы, $d = 0,026$ м; $H_{загр}$ – расстояние между отметками загрузочной трубы, $H_{загр} = 0,7$ м; τ – время движения частицы от верхней метки до нижней, с.

10. Находим массовый расход полиэтилена $G_{нэ}$, кг/с, по формуле (20). Эта величина нам будет нужна при расчёте потери напора на разгон частиц.

$$G_{нэ} = V_{нэ} \rho_{нас}, \quad (20)$$

где $\rho_{нас}$ – насыпная плотность гранул полиэтилена,

$$\rho_{нас} = 558 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

11. Определим порозность зернистого материала в режиме пневмотранспорта

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_2 + V_{нэ}}. \quad (21)$$

Так как объёмный расход воздуха V_2 во много раз больше объёмного расхода гранул полиэтилена $V_{нэ}$, то понятно, что величина порозности ε будет практически равна 1.

12. Определим величину потери давления в пневмостволе и сравним расчётные величины с измеренными в ходе эксперимента (показания цифрового манометра 2). Расчёт будем вести по уравнению (14).

12.1. Статический напор вычислим по формуле (10), смело считая $\varepsilon = 1$.

12.2. Потерю давления на трение воздуха о стенки пневмоствола вычисляем по уравнению (11). Величину коэффициента гидравлического сопротивления λ_1 находим в зависимости от значения критерия Рейнольдса для воздуха

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{ун}} d \rho_2}{\mu_2}; \quad (22)$$

При $\text{Re} < 2000$	$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$
При $2000 < \text{Re} < 5000$	$\lambda = 0,04$
При $5000 < \text{Re} < 10^5$	$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}$

12.3. Потерю давления на трение частиц полиэтилена о стенки пневмоствола рассчитываем по уравнению (12). Скорость частиц полиэтилена найдём как разность между рабочей скоростью воздуха и критической скоростью

$$w_{\text{ч}} = w_p - w_{\text{кр}}. \quad (23)$$

12.4. Потерю давления на разгон частиц вычислим по соотношению (13).

12.5. Теперь сложим найденные величины, определим суммарную потерю давления ΔP (уравнение (14)) и сравним найденную величину с измеренной цифровым дифференциальным манометром (2, рис. 2). Так как наш пневмоствол имеет небольшую вы-

соту, да и концентрация частиц в нём невысокая, то величин ΔP будет иметь небольшое значение.

5. Содержание отчёта

Отчёт о работе должен включать экспериментальные, расчётные и графические материалы, оформленные в следующей последовательности.

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема установки (нарисовать принципиальную схему).
4. Основные расчётные уравнения.
5. Таблицы экспериментальных и расчётных величин.
6. Выводы по работе.

7. Контрольные вопросы

1. Виды пневмотранспорта. Применение пневмотранспорта в различных отраслях промышленности.
2. Что такое критическая скорость и как на неё влияют физические свойства частиц и транспортирующей среды?
3. Что такое скорость уноса?
4. Что такое порозность? Что она характеризует?
5. От каких факторов зависит производительность установок пневмотранспорта?
6. Из каких слагаемых складываются общие потери давления в пневмостволе?
7. Физический смысл критериев гидродинамического подобия.
8. Способы определения расхода потока и его скорости.
9. Как зависит потеря давления в пневмостволе от скорости транспортирующей среды?
10. Изменение высоты и порозности слоя зернистого материала при увеличении скорости воздуха.

10. Литература

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Изд-во Альянс, 2005. – 753 с. ISBN 5-98353-005-3.
2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А Носков. – М., 2005. – 576 с. ISBN 5-98535-006-1.
3. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В.Ф. Фролов. – Л.: «ХИМИЗДАТ», 2008.- 288с. ISBN 5-93808-039-8
4. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. Часть 2. - М., «Химия» 2002.-368 с. ISBN 5-7245-1232-7.

Оглавление

Введение	3
1. Цель лабораторной работы.....	14
2. Описание лабораторной установки	15
3. Последовательность выполнения работы	19
4. Обработка результатов эксперимента	22
5. Содержание отчёта.....	26
7. Контрольные вопросы	26
10. Литература.....	27

Учебное издание

Определение некоторых параметров работы пневмотранспорта

ФИЛИППОВ Вячеслав Васильевич

Авторская редакция

Формат 60×84 ¹/₁₆ . Бумага офсетная

Усл. п. л. 1,44. Уч.-изд. л. 1,42

Тираж 20 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100 г. Самара, Молодогвардейская, 244. Главный корпус