

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

ГИДРОДИНАМИКА НЕПОДВИЖНОГО И ПСЕВДООЖИЖЕННОГО ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ

Процессы взаимодействия газов или капельных жидкостей со слоем дисперсных твёрдых частиц, находящихся в «кипящем» (псевдоожигенном) состоянии, получили значительное распространение. Аппараты с кипящим слоем используются для перемещения и смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов обжига, теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов.

Широкое распространение указанных процессов обусловлено рядом преимуществ, главными из которых являются низкое гидравлическое сопротивление псевдоожигенного слоя и высокие удельные поверхности контакта фаз, обусловленные малым размером дисперсной твёрдой фазы. Как следствие, скорость протекания многих процессов увеличивается.

При относительно небольших скоростях зернистый слой остается неподвижным (рис. 8.1а), и его характеристики (удельная поверхность, порозность, высота и т.д.) не меняются с изменением скорости потока. Однако, когда скорость достигает некоторой критической величины (скорость начала псевдоожигения $v_{кр}$), слой перестаёт быть неподвижным, его порозность и высота начинают увеличиваться, слой приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее (псевдоожигенное) состояние. В таком слое твёрдые частицы интенсивно перемещаются в потоке в различных направлениях (рис. 8.1б), и весь слой напоминает кипящую жидкость. При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота продолжают возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения (скорость уноса), при котором слой разрушается и твёрдые частицы начинают уноситься потоком (рис 8.1в). Явление массового уноса твёрдых частиц потоком газа называют пневмотранспортом и используют в промышленности для перемещения сыпучих материалов.

Псевдоожигение монодисперсного слоя характеризуется

определённым значением критической скорости $v_{кр}$, при которой осуществляется переход слоя в псевдоожиженное состояние, а переход полидисперсного слоя в псевдоожиженное состояние характеризуется определённым интервалом скоростей. При этом нижний предел интервала соответствует переходу в состояние псевдоожижения мелких частиц, а верхний предел – полному псевдоожижению слоя.

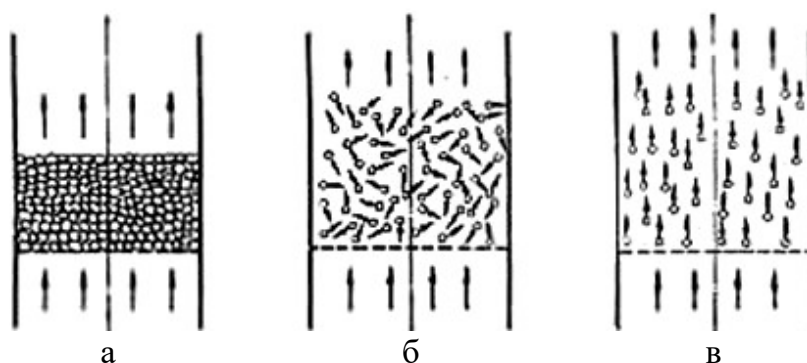


Рис. 8. 1. Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц:
а – неподвижный слой; б – кипящий (псевдоожиженный слой);
в – унос твердых частиц потоком

Состояние зернистого слоя может быть представлено в виде зависимости гидравлического сопротивления слоя Δp от скорости псевдоожижающего потока.

На рис. 8.2а показана зависимость для монодисперсного слоя.

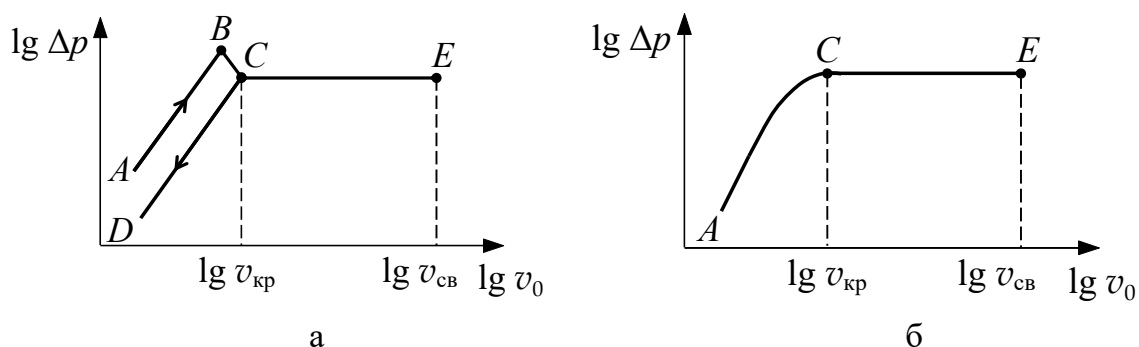


Рис. 8.2. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости потока:
а – монодисперсный слой, б – полидисперсный слой

По мере возрастания скорости потока увеличивается гидравлическое сопротивление неподвижного слоя. Начало псевдоожижения наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления слоя весу всех его

частиц (рис. 8. 2а). Однако в действительности перепад давлений в слое, соответствующий точке В (рис. 8.2а), т.е. непосредственно перед началом псевдоожижения (точка С), несколько больше, чем это необходимо для поддержания слоя во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сил сцепления между частицами слоя, находящегося в покое. Когда скорость потока достигает значения $v_{кр}$, частицы преодолевают силы сцепления и перепад давлений становится равным весу частиц, приходящемуся на единицу площади поперечного сечения аппарата.

Из рис. 8.2а видно, что указанное условие равенства перепада давлений весу частиц выполняется для всей области существования псевдоожиженного слоя (линия СЕ), вплоть до того момента, когда скорость становится такой, при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц потоком. Эту скорость называют скоростью уноса (или скоростью свободного витания частиц) и обозначают символом $v_{св}$.

Пределы существования псевдоожиженного слоя ограничены, следовательно, снизу – скоростью начала псевдоожижения – критической скоростью $v_{кр}$, и сверху – скоростью свободного витания $v_{св}$.

На рис. 8.2б показана зависимость гидравлического сопротивления неподвижного и псевдоожиженного слоя для полидисперсных материалов. Размытость начала псевдоожижения для полидисперсного слоя объясняется тем, что для разных фракций материала псевдоожижение начинается при различных скоростях.

Гидравлическое сопротивление слоя при фильтрации газа через неподвижный слой может быть рассчитано по уравнению Эргуна:

$$\Delta p = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\psi^2 \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \frac{h_0}{d_0^2} \cdot \mu_r \cdot v_0 + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\psi \cdot \varepsilon_0^3} \cdot \frac{h_0}{d_0} \cdot \rho_r \cdot v_0^2, \quad (8.1)$$

где v_0 – фиктивная скорость потока, м/с; ρ_r – плотность газа, кг/м³; μ_r – динамическая вязкость газа, Па·с; h_0 – высота слоя в неподвижном состоянии, м; d_0 – размер частицы (диаметр эквивалентного шара), м;

$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_ч}$ – порозность слоя в неподвижном состоянии; $\rho_{нас}$ – насыпная

плотность слоя, кг/м³; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/м³; ψ – параметр сферичности.

Перед началом псевдооживления объём неподвижного слоя немного возрастает, поэтому порозность слоя $\varepsilon_{\text{кр}}$ при скорости, равной $v_{\text{кр}}$, примерно на 10 % выше, чем порозность неподвижного слоя при $v_0 = 0$:

$$\varepsilon_{\text{кр}} = 1,1 \cdot \varepsilon_0. \quad (8.2)$$

Равенство гидравлического сопротивления неподвижного слоя весу частиц, отнесённому к площади поперечного сечения аппарата при скорости потока, равной $v_{\text{кр}}$, приводит к следующему квадратному уравнению относительно критического значения числа Рейнольдса:

$$\text{Ar} = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{кр}})}{\psi^2 \cdot \varepsilon_{\text{кр}}^3} \cdot \text{Re}_{\text{кр}} + \frac{1,75}{\psi \cdot \varepsilon_{\text{кр}}^3} \cdot \text{Re}_{\text{кр}}^2, \quad (8.3)$$

где $\text{Ar} = \frac{d_0^3 \cdot g \cdot \rho_{\Gamma}^2}{\mu_{\Gamma}^2} \cdot \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}$ – число Архимеда; $\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{v_{\text{кр}} \cdot d_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}$ –

критическое число Рейнольдса; g – ускорение свободного падения, м/с².

Для слоёв с небольшой полидисперсностью $\text{Re}_{\text{кр}}$ может быть определено из уравнения (8.3) при подстановке в число Архимеда величины среднего диаметра, определяемого по формуле:

$$d_{\text{ср}} = \left(\sum_1^N \frac{n_i}{d_i} \right)^{-1}, \quad (8.4)$$

где d_i – диаметр i -й фракции, n_i – массовая доля i -й фракции.

Величина критической скорости начала псевдооживления определяется из значения $\text{Re}_{\text{кр}}$:

для монодисперсного слоя

$$v_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \mu_{\Gamma}}{d_0 \cdot \rho_{\Gamma}}, \quad (8.5)$$

и для полидисперсного слоя

$$v_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \mu_{г}}{d_{ср} \cdot \rho_{г}} . \quad (8.6)$$

Скорость свободного витания, равная скорости начала уноса частиц из слоя, может быть рассчитана как скорость свободного осаждения частиц. Формулы для расчёта скорости свободного осаждения частиц приводятся в описании лабораторной работы 7 «Определение скорости свободного осаждения твёрдых частиц и всплытия пузырей в жидкостях». Скорость уноса из полидисперсных слоёв определяется по диаметру наименьших частиц.

Гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя определяется по уравнению:

$$\Delta p_{пс} = h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot (\rho_{ч} - \rho_{г}) \cdot g . \quad (8.7)$$

Цель работы: визуальное ознакомление с псевдооживленным состоянием слоя зернистого материала; экспериментальное определение скорости начала псевдооживления $v_{кр}$ и гидравлического сопротивления неподвижного и “кипящего” слоя; сопоставление экспериментальных и расчётных величин; расчёт скорости свободного витания.

Описание установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 8.3.

Основными элементами лабораторной установки являются колонны K_1 и K_2 внутренним диаметром $D = 105$ мм каждая. В средней части каждой колонны на опорной решётке помещён зернистый материал. Характеристики материалов приводятся в табл. 8.1.

Высота зернистого слоя в неподвижном состоянии измеряется линейкой.

Перепад давлений в точках до слоя и после него измеряется U-образными дифференциальными манометрами (поз. 1, 2), заполненными водой.

Таблица 8.1

Характеристики зернистых материалов

Характеристика	Колонка 1	Колонка 2
Материал частиц	полиэтилен	активный уголь ФАС
Плотность частиц $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	832	765
Размер частиц (диаметр эквивалентного шара), мм	3,9	2,1 (средний диаметр)
Параметр сферичности	$\cong 0,80$	$\cong 0,82$
Насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$, кг/м ³	490	460

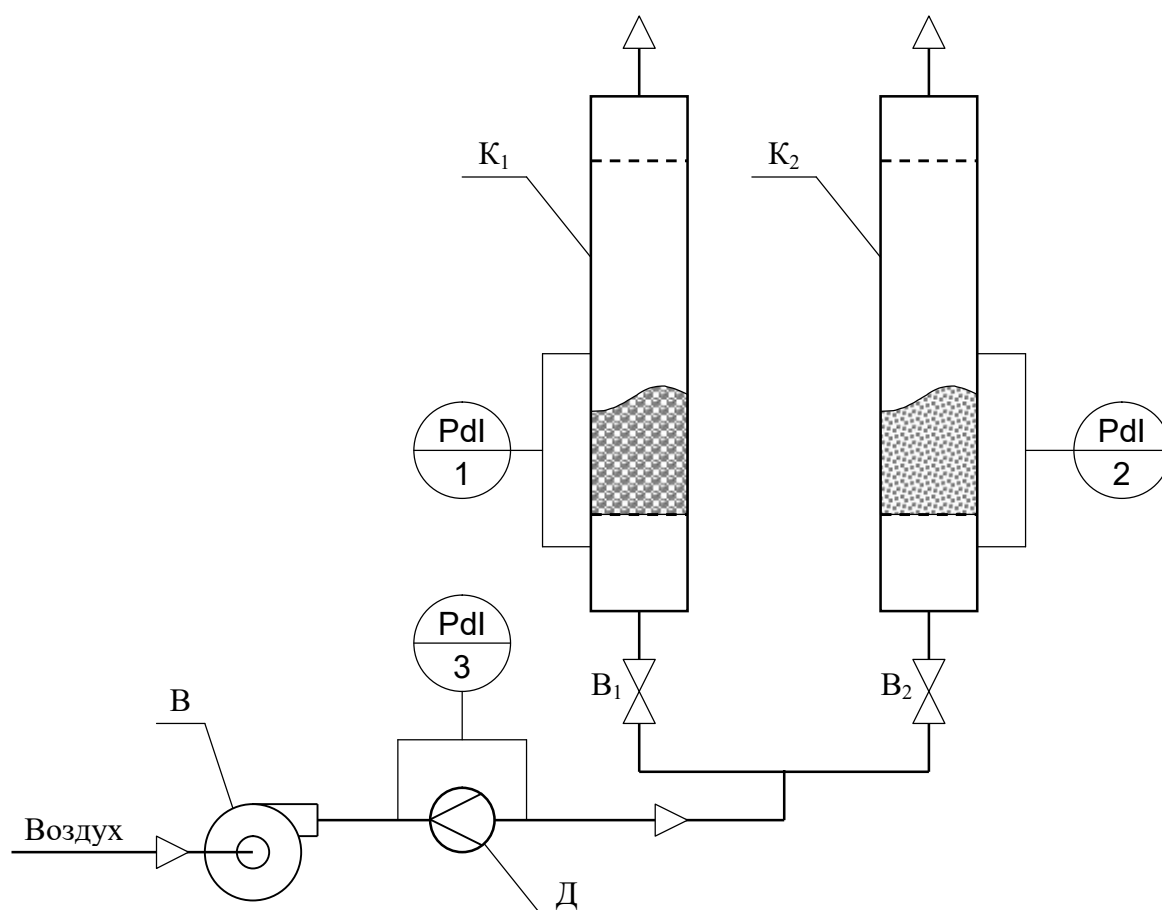


Рис. 8.3. Схема лабораторной установки для исследования гидродинамики зернистого слоя [10]:

В – воздушодувка, Д – диафрагма, К₁ – К₂ – колонны, В₁ – В₂ – вентили

Воздух воздуходувкой В подаётся поочерёдно либо в колонну K_1 , либо в колонну K_2 с помощью вентиля В₁ и В₂. Сброс воздуха, подаваемого по общей линии, осуществляется вентилем В₃. На линии подачи воздуха установлена измерительная диафрагма Д, соединённая с U-образным дифференциальным манометром (поз. 3), заполненным водой.

Расход воздуха определяется по калибровочному графику, приведённому на рис. 8.4.

Методика выполнения работы

1. Измерьте линейкой высоту зернистых слоёв в неподвижном состоянии.

2. Приоткрыв вентиль В₁ или В₂, в зависимости от исследования зернистого слоя полиэтилена или активного угля, зафиксируйте показания манометра, соединённого с диафрагмой Δh_m , и манометра, измеряющего гидравлическое сопротивление слоя $\Delta p_{сл}$.

3. Увеличивая степень открытия вентиля В₁ или В₂, зафиксируйте новые показания манометров. Опыты продолжайте до определяемого визуально начала псевдооживления. Это начало соответствует $v_{кр}$. Полученных таким образом экспериментальных точек для неподвижного слоя должно быть не менее 4 – 5.

4. После перехода зернистого слоя в псевдооживленное состояние гидравлическое сопротивление его не изменяется. Проследите постоянство гидравлического сопротивления $\Delta p_{сл}$ при увеличении фиктивной скорости воздуха, получив ещё 4 – 5 экспериментальных точек для псевдооживленного слоя. Последнее измерение проведите при максимальном расходе воздуха, т.е. при полностью открытом вентиле В₁ или В₂.

5. Выключите воздуходувку и закройте вентили В₁ и В₂.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитайте объёмный расход воздуха для каждой экспериментальной точки, используя уравнение расхода диафрагмы:

$$\dot{V} = \alpha_p \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_m \cdot \frac{\rho_m - \rho_r}{\rho_r}}, \quad (8.8)$$

где α_p – коэффициент расхода диафрагмы, который в первом приближении можно принять равным 0,62;

$S_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2$ – площадь сечения отверстия в диафрагме;

$d_0 = 20$ мм – диаметр отверстия в диафрагме;

ρ_m – плотность манометрической жидкости (воды).

2. Рассчитайте константу диафрагмы $m_d = \left(\frac{d_0}{d_{тр}} \right)^2$, где $d_{тр} = 48$ мм –

диаметр трубопровода, соединяющего воздухоудвку и колонны, в котором установлена диафрагма.

3. Для каждой экспериментальной точки рассчитайте число Рейнольдса для движения потока воздуха в трубопроводе:

$$Re_{тр} = \frac{v_{тр} \cdot d_{тр} \cdot \rho_r}{\mu_r}, \quad (8.9)$$

где $v_{тр} = \frac{\dot{V}}{S_{тр}} = \frac{4 \dot{V}}{\pi d_{тр}^2}$ – скорость воздуха в трубопроводе.

4. Воспользовавшись таблицей 8.2, определите уточнённые значения коэффициента расхода диафрагмы, опираясь на константу диафрагмы m_d и значения числа Рейнольдса $Re_{тр}$ для каждой экспериментальной точки.

Таблица 8.2

Значения коэффициента расхода диафрагмы

Re	Коэффициент расхода α_p в зависимости от константы m_d							
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
5 000	0,6032	0,6110	0,6341	—	—	—	—	—
10 000	0,6026	0,6092	0,6261	0,6530	0,6890	0,7367	0,7975	—
20 000	0,5996	0,6050	0,6212	0,6454	0,6765	0,7186	0,7753	0,8540
30 000	0,5990	0,6038	0,6187	0,6403	0,6719	0,7124	0,7650	0,8404
50 000	0,5984	0,6032	0,6168	0,6384	0,6666	0,7047	0,7553	0,8276
100 000	0,5980	0,6026	0,6162	0,6359	0,6626	0,6992	0,7472	0,8155
400 000	0,5978	0,6020	0,6150	0,6340	0,6600	0,6950	0,7398	0,8019

5. Пересчитайте расход воздуха для каждой экспериментальной точки по уравнению (8.8), используя уточнённые коэффициенты расхода диафрагмы.

6. По уравнению расхода рассчитайте фиктивную скорость потока воздуха в колонне для каждой точки: $v_0 = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{4 \dot{V}}{\pi D^2}$.

7. Результаты измерений и расчётов занесите в табл 8.3.

8. Постройте графики зависимости гидравлического сопротивления $\Delta p_{\text{сл}}$ от фиктивной скорости потока v_0 . Для монодисперсного слоя полиэтилена определите экспериментальное значение скорости начала псевдоожижения $v_{\text{кр}}$. Для полидисперсного слоя активного угля определите точку перехода в псевдоожиженное состояния всех частиц слоя, которая аналогична точке С на рис. 8.2б.

Таблица 8.3

Экспериментальные и расчётные величины

№ п/п	$\Delta h_{\text{м}},$ мм вод. ст.	$\dot{V},$ м ³ /с	$v_0,$ м/с	$\Delta p_{\text{сл}},$ мм вод. ст.
1.				
2.				
...				
<i>n</i>				

9. Найдите критическое число Рейнольдса, как корень квадратного уравнения (8.3).

10. Рассчитайте скорость начала псевдоожижения $v_{\text{кр}}$ по формуле (8.5). Сопоставьте рассчитанное и экспериментальное значение этой скорости.

10. Рассчитайте гидравлическое сопротивление неподвижного слоя Δp по уравнению (8.1) при двух значениях фиктивной скорости v_0 и сопоставьте эти значения с величинами, определёнными опытным путём при тех же фиктивных скоростях.

11. По уравнению (8.7) определите гидравлическое сопротивление псевдоожиженного слоя и сопоставьте это значение с экспериментально

найденными.

12. Рассчитайте число Рейнольдса для свободного витания частиц и скорость свободного витания:

$$\text{Re}_{\text{св}} = \frac{\text{Ar}_{\text{min}}}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{\text{Ar}_{\text{min}}}}, \quad (8.10)$$

$$v_{\text{св}} = \frac{\text{Re}_{\text{св}} \cdot \mu_{\Gamma}}{d_{\text{min}} \cdot \rho_{\Gamma}}, \quad (8.11)$$

где d_{min} – минимальный диаметр частиц в слое;

Ar_{min} – число Архимеда для наименьших частиц слоя.

Для монодисперсного слоя полиэтилена $d_{\text{min}} = d_{\text{ср}}$, и можно воспользоваться ранее рассчитанным числом Архимеда

Для полидисперсного слоя активного угля $d_{\text{min}} = 1,5$ мм, и требуется пересчёт числа Архимеда.

13. Выполнив расчёт для обеих колонн, сделайте выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы, проводимые в псевдоожиженных слоях, вы знаете?
2. В чём заключается отличие однородного и неоднородного псевдоожижения?
3. Дайте определение порозности и удельной поверхности слоя.
4. Как объяснить начало псевдоожижения и уноса частиц исходя из равновесия сил?
5. Как рассчитать скорость начала псевдоожижения и скорость уноса?
6. Равна ли порозность слоя при нулевой скорости потока порозности при скорости начала псевдоожижения?
7. Как изменяются объём псевдоожиженного слоя и его порозность при увеличении фиктивной скорости воздуха?
8. Какова связь насыпной плотности слоя и плотности частицы?
9. К какой модели структуры потоков приближается движение твёрдых частиц в псевдоожиженном слое? Как структура потоков ограничивает применение псевдоожижения в массообменных процессах?