



СОВРЕМЕННОЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА
ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ

www.measlab.ru

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 пе-

переход слоя в псевдооживенное состояние, а переход полидисперсного слоя в псевдооживенное состояние характеризуется определённым интервалом скоростей. При этом нижний предел интервала соответствует переходу в состояние псевдооживения мелких частиц, а верхний предел – полному псевдооживению слоя.

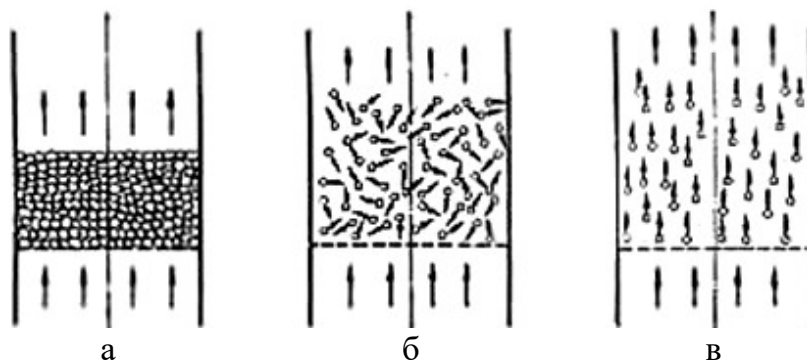


Рис. 8. 1. Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц:
а – неподвижный слой; б – кипящий (псевдооживенный слой);
в – унос твердых частиц потоком

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

На рис. 8.2а показана зависимость для монодисперсного слоя.

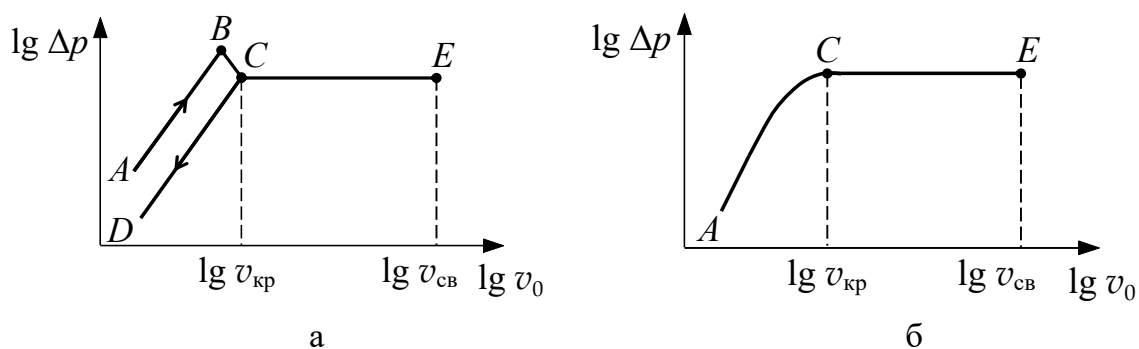


Рис. 8.2. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости потока:
а – монодисперсный слой, б – полидисперсный слой

По мере возрастания скорости потока увеличивается гидравлическое сопротивление неподвижного слоя. Начало псевдооживения наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления слоя весу всех его частиц (рис. 8. 2а). Однако в действительности перепад давлений в слое, со-

ответствующий точке В (рис. 8.2а), т.е. непосредственно перед началом псевдооживления (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 псевдооживленного 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 псевдооживленного слоя ограничены, следовательно, снизу – скоростью начала псевдооживления – критической скоростью $v_{кр}$, и сверху – скоростью свободного витания $v_{св}$.

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

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

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

где v_0 – фиктивная скорость потока, м/с; ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; μ_{Γ} – динамическая вязкость газа, Па·с; h_0 – высота слоя в неподвижном состоянии, м; d_0 – размер частицы (диаметр эквивалентного шара), м; $\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{\text{ч}}}$ – порозность слоя в неподвижном состоянии; $\rho_{нас}$ – насыпная плотность слоя, кг/м³; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/м³; ψ – параметр сферич-

ности.

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

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

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

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

где $Ar = \frac{d_0^3 \cdot g \cdot \rho_{\Gamma}^2}{\mu_{\Gamma}^2} \cdot \frac{\rho_{ч} - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}$ – число Архимеда; $Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}$ – критическое число Рейнольдса; g – ускорение свободного падения, м/с².

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

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

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

Величина критической скорости начала псевдооживления определяется из значения $Re_{кр}$:

для монодисперсного слоя

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

и для полидисперсного слоя

$$v_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \mu_{\Gamma}}{d_{\text{ср}} \cdot \rho_{\Gamma}} . \quad (8.6)$$

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:

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

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

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Установка предусматривает изучение конструкции аппаратов, предназначенных для сушки в динамических средах. При проведении лабораторных работ исследуются основные процессы псевдоожижения и сушки мелкодисперстных материалов.

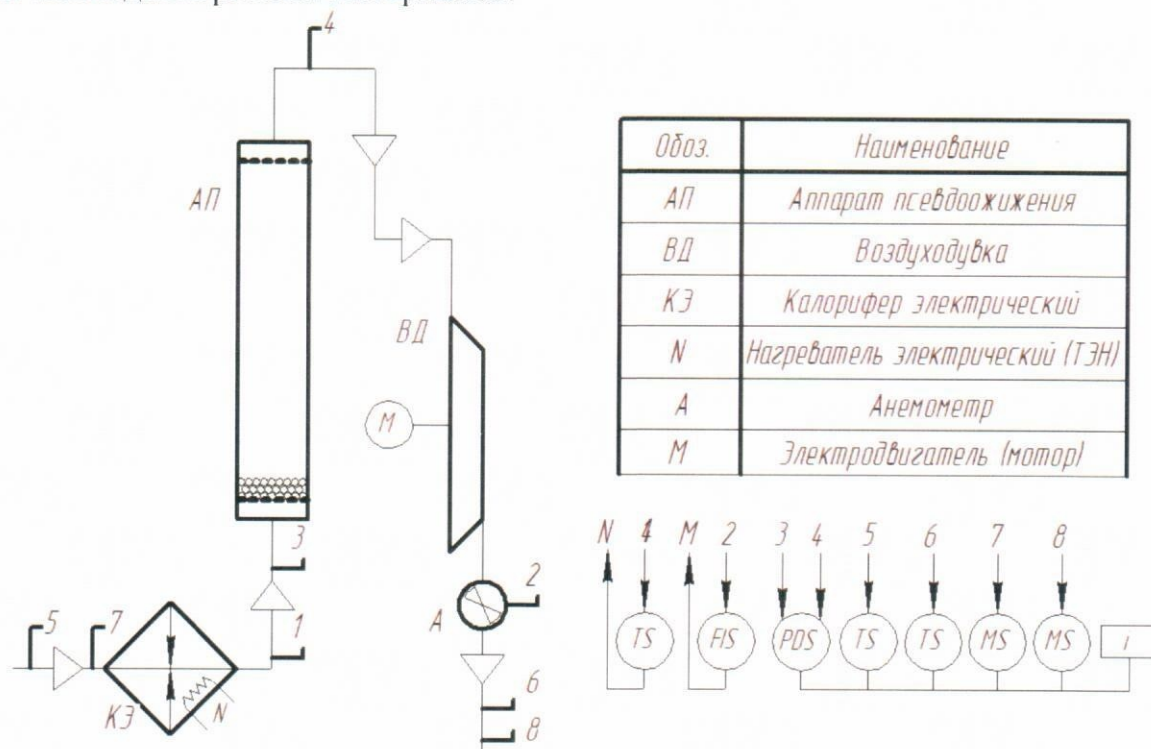


Рисунок 1. Принципиальная схема установки

Замеряемые параметры

- 1 – Температура воздуха после калорифера.
- 2 – Скорость воздуха.
- 3, 4 – Разность давлений в аппарате псевдоожижения.
- 5 – Температура воздуха на входе.
- 6 – Температура воздуха на выходе.
- 7 – Влажность воздуха на входе.
- 8 – Влажность воздуха на выходе.

Попеременное подключение отдельных аппаратов осуществляется с помощью гибкого шланга.

Сопротивление аппарата псевдоожижения измеряется с помощью дифференциальных манометров.

Использование частотного регулятора позволяет менять расход воздуха за счет изменения числа оборотов электродвигателя воздуходувки.

Основным рабочим элементом установки является аппарат псевдоожижения состоящий из стеклянного цилиндра с восходящим потоком воздуха и двумя фильтрующими сетками на входе и выходе для удерживания сыпучего материала. Движение воздуха создается вихревой воздуходувкой, создающей разрежение на верхнем конце цилиндра. Расход воздуха измеряется с помощью анемометра. Падение давления в слое продукта замеряется дифференциальным датчиком.

В лабораторной работе измеряются и анализируются два основных параметра – скорость воздушного потока через неподвижный или псевдоожиженный слой материала и перепад давления на этом слое.

Измерение перепада давления осуществляется дифференциальным датчиком давления. Сигналы с датчиков подаются на измеритель-регулятор ТРМ 202.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы, устройством установки рис. 1 и системы измерений.
2. Подготовить навеску сыпучего материала порядка 30 г.
3. Определить и описать основные свойства материала – плотность, размеры, форму частиц и высоту слоя материала, помещенного в загрузочное устройство.
4. Установить загрузочное устройство в нижнюю часть цилиндра.
5. Подключить компьютер к USB- разьему системы измерения.
6. Включить питание стенда с помощью автоматического выключателя «Сеть».
7. Установить на частотном преобразователе дистанционное управление и минимальную частоту вращения вала вихревой воздуходувки.
8. Включить компьютер. Выбрать программу сбора и обработки данных «Псевдооживление» и запустить ее.
9. Включить воздуходувку с помощью клавиши «ВК1».
10. При включении компьютерной системы измерения на лицевой панели отображаются значения перепада давлений и расхода воздуха через слой сыпучего материала.
11. Медленно увеличивая частоту наблюдать за поведением слоя сыпучего материала, фиксируя стадии - неподвижного слоя (режим фильтрации), его разрыхления, начало псевдооживления, достижения первой ($v_{1кр}$) и второй ($v_{2кр}$) критических скоростей. Одновременно с помощью компьютерной системы измерять и регистрировать изменение перепада давления и скорости воздушного потока, проходящего через сыпучий материал.
12. При достижении второй критической скорости (уноса сыпучего материала) остановить работу системы измерения кнопкой «Стоп». При этом полученные массивы данных автоматически обрабатываются в виде зависимостей перепада давлений на сыпучем слое от скорости потока.
13. Полученные результаты перенести в табл. 1.1. При необходимости они могут быть сохранены в Excel с помощью соответствующей команды, задаваемой с лицевой панели программы.
14. Построить по результатам опыта зависимость перепада давлений на слое материала ΔP от скорости потока воздуха v , см. рис. 1.3.

Табл. 1.1

Результаты эксперимента

№	Состояние слоя	Объёмный расход, $\text{м}^3/\text{с}$	Скорость, $\text{м}/\text{с}$	Сопротивление слоя, Па
1	неподвижный			
2	неподвижный			
3	неподвижный			
4	начало псевдооживления			
5	псевдооживленный			
6	псевдооживленный			
7	псевдооживленный			

Обработка экспериментальных данных

Характеристики зернистого слоя

Измерить частицу зернистого материала с помощью штангенциркуля. Если форма частицы отличается от сферической, следует получить три её размера, которые условно назовём длиной, шириной и высотой. Изменения построить для нескольких частиц.

Вычислим объём частицы:

– если частица представляет собой шар диаметром d

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi}{6} \cdot d^3;$$

– если частица представляет собой цилиндр диаметром d и высотой h

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h;$$

– если частица представляет собой эллипсоид длиной l , шириной b и высотой h

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi}{6} \cdot l \cdot b \cdot h;$$

– если частица представляет собой эллиптический цилиндр длиной l , шириной b и высотой h

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi}{4} \cdot l \cdot b \cdot h.$$

Рассчитать эквивалентный диаметр частиц:

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{ч}}}{\pi}}.$$

Очевидно, что для сферической частицы эквивалентный диаметр равен диаметру частицы $d_{\text{э}} = d$.

Взвесить навеску зернистого материала, состоящую не менее чем из 10 частиц. Разделив массу навески на число частиц, определить среднюю массу частиц в слое $m_{\text{ч}}$. Разделив массу частицы на объём, получить кажущуюся плотность частиц слоя:

$$\rho_{\text{с}} = \frac{m_{\text{ч}}}{V_{\text{ч}}}.$$

Насыпав слой частиц в мерный цилиндр, измерить объём зернистого

слоя $V_{\text{сл}}$. Взвесив слой частиц, насыпанных в мерный цилиндр, получить массу зернистого слоя $m_{\text{сл}}$. Разделив массу слоя на его объём, получить насыпную плотность зернистого слоя:

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{m_{\text{сл}}}{V_{\text{сл}}}.$$

Рассчитать порозность неподвижного зернистого слоя:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_S}.$$

Определение экспериментального значения скорости начала псевдоожижения

По уравнению расхода рассчитать фиктивную скорость для каждой точки:

$$v_i = \frac{\dot{V}_i}{S},$$

где $\dot{V}_i$ – объёмный расход (который следует перевести из л/мин в м³/с);

$S = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$ – площадь сечения колонны;

$D = 45$ мм – внутренний диаметр колонны.

Построить график зависимости гидравлического сопротивления слоя $\Delta p_{\text{сл}}$ от фиктивной скорости потока v_i (рис. 4). По графику определить экспериментальное значение скорости начала псевдоожижения $v_{\text{пс}}$.

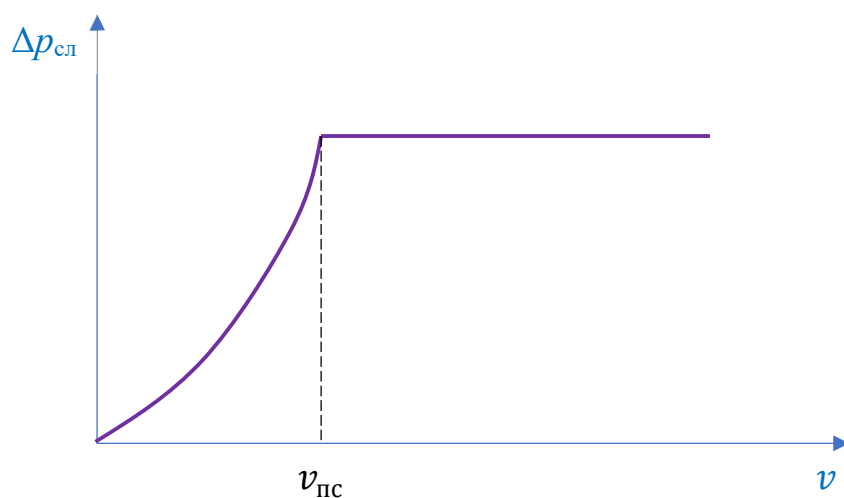


Рис. 4. Определение скорости начала псевдоожижения

Расчёт теоретического значения скорости начала псевдооживления

Рассчитать число (критерий) Архимеда:

$$Ar = \frac{d_3^3 g \rho_G^2}{\mu_G^2} \cdot \frac{\rho_S - \rho_G}{\rho_G},$$

где ρ_G и μ_G – плотность и вязкость псевдооживляющего агента (воздуха).

Рассчитать число (критерий) Рейнольдса для начала псевдооживления:

$$Re_{\text{пс}} = \frac{Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon_0^{4,75}}}.$$

Рассчитать теоретическое значение скорости начала псевдооживления:

$$v_{\text{пс}} = Re_{\text{пс}} \cdot \frac{\mu_G}{d_3 \rho_G},$$

сравнить теоретическое значение с экспериментальным.

Рассчитать число (критерий) Рейнольдса для свободного витания частиц:

$$Re_{\text{св}} = \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar}}.$$

Рассчитать скорость свободного витания частиц:

$$v_{\text{св}} = Re_{\text{св}} \cdot \frac{\mu_G}{d_3 \rho_G},$$

сравнить значение скорости свободного витания с наибольшим из экспериментальных значений скорости.

Рассчитать теоретическое значение гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя:

$$\Delta p_{\text{сл}} = H_0 (1 - \varepsilon_0) (\rho_S - \rho_G) g,$$

где H_0 – высота неподвижного слоя в колонне.

Сравнить теоретическое значение с экспериментальным.

Сделать выводы о сходимости экспериментального и теоретического значений скорости начала псевдооживления; о том, достигнут ли режим уноса частиц, и о сходимости экспериментального и теоретического значений гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя.

Контрольные вопросы

1. Какие процессы, проводимые в псевдооживленных слоях, вы знаете?
2. В чём заключается отличие однородного и неоднородного псевдооживления?
3. Дайте определение порозности и удельной поверхности слоя.
4. Как объяснить начало псевдооживления и уноса частиц исходя из равновесия сил?
5. Как рассчитать скорость начала псевдооживления и скорость уноса?
6. Равна ли порозность слоя при нулевой скорости потока порозности при скорости начала псевдооживления?
7. Как изменяются объём псевдооживленного 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 псевдооживленном слое? Как структура потоков ограничивает применение псевдооживления в массообменных процессах?

Физические свойства сухого воздуха
($p = 100 \text{ кПа} = 750 \text{ мм рт. ст.}$)

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\mu \cdot 10^6, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$c_p, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	Pr
15	1,209	17,91	1006	0,0252	0,714
16	1,205	17,95	1006	0,0253	
17	1,201	18,00	1006	0,0254	
18	1,197	18,05	1006	0,0254	
19	1,193	18,10	1006	0,0255	
20	1,189	18,15	1006	0,0256	
21	1,185	18,20	1006	0,0256	
22	1,181	18,24	1006	0,0257	
23	1,177	18,29	1006	0,0258	
24	1,173	18,34	1006	0,0258	
25	1,169	18,39	1006	0,0259	
26	1,165	18,43	1006	0,0260	
27	1,161	18,48	1006	0,0260	
28	1,157	18,53	1006	0,0261	
29	1,153	18,58	1006	0,0262	
30	1,150	18,62	1006	0,0262	
31	1,146	18,67	1006	0,0263	
32	1,142	18,72	1006	0,0264	
33	1,138	18,77	1006	0,0264	
34	1,135	18,81	1006	0,0265	
35	1,131	18,86	1006	0,0266	

Физические свойства воздуха (плотность ρ , динамическая вязкость μ , теплопроводность λ) при температурах и давлениях, не приведённых в таблице, с достаточной точностью могут быть рассчитаны по формулам:

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}; \quad (\text{П.3})$$

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}; \quad (\text{П.4})$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}, \quad (\text{П.5})$$

где $\rho_0 = 1,2928 \text{ кг/м}^3$; $\mu_0 = 17,17 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\lambda_0 = 0,0242 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – свойства воздуха при $T_0 = 273,15 \text{ К}$ и $p_0 = 101325 \text{ Па}$; $C = 112,0 \text{ К}$ – константа Сазерленда для воздуха.