

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»**

Кафедра энергоресурсосберегающих процессов  
в химической и нефтегазовой технологиях

## **ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ ВОЗДУХОМ**

Методические указания к лабораторной работе № 6 по дисциплине  
**«Процессы и аппараты химической технологии»**  
для обучающихся направлений подготовки  
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии  
18.03.01 Химическая технология  
20.03.01 Техносферная безопасность  
всех форм обучения

Составители Н. В. Тиунова  
Н. Н. Изотов  
П. Т. Петрик

Рассмотрены и утверждены  
на заседании кафедры  
Протокол № 2 от 09.10.2018  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления подготовки 18.03.02  
Протокол № 2 от 09.10.2018  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2018

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – закрепление знаний по теме «Гидродинамика кипящих (псевдоожигенных) слоев», изучение зависимости гидравлического сопротивления и порозности зернистого слоя от скорости потока псевдоожигающего газа, определение скорости начала псевдоожигения и сопоставление полученных результатов с теоретическими данными.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время ряд процессов химической технологии, при которых происходит взаимодействие газа или жидкости с мелкораздробленным твердым материалом (сушка, обжиг, адсорбция, каталитические процессы), осуществляют в аппаратах с так называемым взвешенным (псевдоожигенным) или кипящим слоем. В таких аппаратах указанные процессы значительно ускоряются.

Если через неподвижный слой твердых частиц, лежащих на решетке, пропускать снизу вверх поток газа и при этом постепенно увеличивать его скорость, то при некоторой скорости газа, называемой критической, весь слой твердых частиц переходит во взвешенное состояние. При дальнейшем повышении скорости газа в аппарате объем взвешенного слоя возрастает. Такой расширившийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость – он «течет», принимая форму сосуда, поэтому его часто и называют *кипящим* или *псевдоожигенным* слоем. При дальнейшем увеличении скорости газа продолжается расширение взвешенного слоя.

Наконец, при некоторой скорости, называемой *скоростью уноса*, взвешенный слой разрушается, твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа – возникает их пневмотранспорт.

Обозначим площадь поперечного сечения аппарата через  $S$  (м<sup>2</sup>), а объемный расход газа через  $V_{\text{сек}}$  (м<sup>3</sup>/с). Тогда скорость газа, отнесенная к полному поперечному сечению пустого аппа-

рата, или так называемая *фиктивная скорость*  $\omega_0$  (м/с) будет равна

$$\omega_0 = V_{\text{сек}} / S. \quad (1)$$

*Действительная скорость* газа  $\omega$  в промежутках между частицами слоя, измерить которую трудно, всегда будет больше фиктивной.

Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа показана на рис. 1.

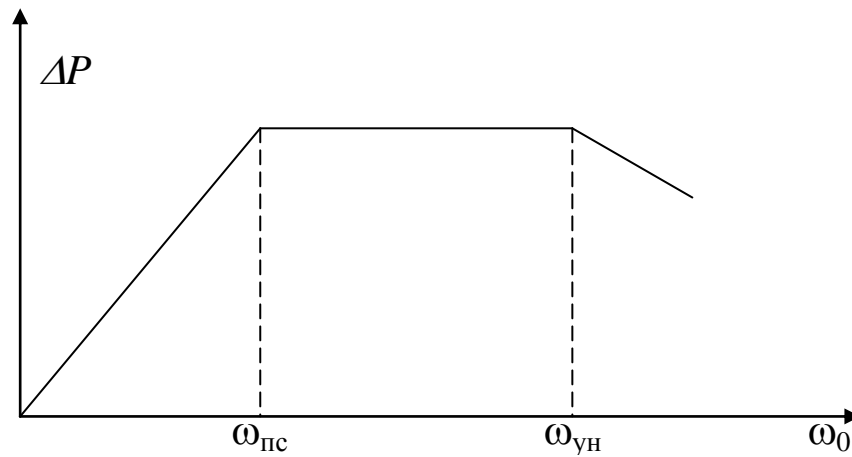


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости

Как видно из рисунка 1, в области существования взвешенного слоя, начиная от критической скорости газа  $\omega_{\text{кр}}$  до скорости уноса  $\omega_{\text{ун}}$ , величина  $\Delta P$  сохраняет постоянное значение. Причина этого рассмотрена ниже.

Переход твердых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние начнется тогда, когда сила  $R$  динамического воздействия потока среды на частицу станет равной весу частицы  $G$  за вычетом подъемной (архимедовой) силы  $A$ .

$$R = G - A, \quad (2)$$

для шаровой частицы

$$R = \varphi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega^2 \rho}{2}, \quad (3)$$

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{т}} g, \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho g, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от режима течения среды;  $d$  – диаметр частицы, м;  $\omega$  – действительная скорость среды между частицами, м/с;  $\rho_t$ ,  $\rho$  – плотность частицы и среды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Из уравнений (4) и (5) находим:

$$G - A = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_t - \rho) g, \quad (6)$$

Уравнение (2) справедливо и для всего слоя. Когда все частицы слоя перешли во взвешенное состояние, давление газа перед слоем должно преодолевать вес частиц, приходящихся на единицу площади поперечного сечения аппарата  $S$ .

Отсюда

$$\Delta P = G_{\text{сл}} / S, \quad (7)$$

где  $G_{\text{сл}}$  – вес твердых частиц, Н.

$$G_{\text{сл}} = V_{\text{ч}} (\rho_t - \rho) g, \quad (8)$$

где  $V_{\text{ч}} = H_{\text{н}} S (1 - \varepsilon_{\text{н}})$  – объем, занимаемый твердыми частицами, м<sup>3</sup>;  $H_{\text{н}}$  – высота неподвижного слоя, м;  $\varepsilon_{\text{н}}$  – порозность неподвижного слоя.

Из уравнения (7) видно, что для взвешенного слоя потеря давления  $\Delta P$  постоянна, то есть не зависит от скорости газа  $\omega_0$ . Это постоянство величины  $\Delta P$  объясняется тем, что при повышении расхода газа и его фиктивной скорости происходит одновременное увеличение объема взвешенного слоя и расстояния между частицами. Вследствие этого действительная скорость газа между частицами, от которой зависит сопротивление слоя, остается неизменной.

Гидравлическое сопротивление неподвижного слоя определяется уравнением

$$\Delta P = \lambda \frac{H_{\text{н}}}{d_{\text{к}}} \frac{\omega^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$  – коэффициент сопротивления для ламинарного течения

в поровых каналах слоя;  $d_k = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_n}{(1 - \varepsilon_n)} d$  – эквивалентный

диаметр поровых каналов;  $\text{Re} = \frac{\omega d_k \rho}{\mu_c}$  – критерий Рейнольдса;

$\omega = \frac{\omega_0}{\varepsilon_n}$  – локальная скорость движения газа;  $\mu_c$  – вязкость среды, Па·с.

В результате подстановки указанных выражений в зависимость (9) получается одна из наиболее распространенных практических формул по определению гидравлического сопротивления неподвижного слоя, получившей название «формула Эргана»:

$$\Delta P = 150 \frac{(1 - \varepsilon_n)^2}{\varepsilon_n^3} \frac{\mu_c \omega_0 H_n}{d^2} + 1,75 \frac{H_n (1 - \varepsilon_n)}{\varepsilon_n^3} \frac{\rho \omega_0^2}{d}. \quad (10)$$

Коэффициенты 150 и 1,75 подобраны на основании обработки многочисленных экспериментальных данных различных авторов.

Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц как неподвижного, так и взвешенного, является *порозность*  $\varepsilon$  – объемная доля пустот в слое:

$$\varepsilon = \frac{V - V_{\text{ч}}}{V} = 1 - \frac{V_{\text{ч}}}{V} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_{\text{т}}} \quad (11)$$

где  $V$  – общий объем, занимаемый слоем,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ч}}$  – объем, занимаемый твердыми частицами,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_n$  – насыпная плотность слоя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для неподвижного слоя сферических частиц одинакового диаметра порозность составляет приблизительно 0,4 независимо от диаметра частиц. Для взвешенного слоя порозность  $\varepsilon_{\text{пс}}$  с увеличением расхода газа будет повышаться, так как объем взвешенного слоя при этом возрастает.

Порозность псевдооживленного слоя определяется уравнением

$$\varepsilon_{\text{пс}} = \frac{H_{\text{пс}} - (1 - \varepsilon_n) H_n}{H_{\text{пс}}}, \quad (12)$$

где  $H_n$  – высота неподвижного слоя, м;  $H_{пс}$  – высота псевдооживленного слоя, м;  $\varepsilon_n$  – порозность неподвижного слоя.

При скорости уноса  $\omega_{ун}$ , предельной для взвешенного слоя, можно считать, что  $V \gg V_q$  и  $\varepsilon = 1$ .

Таким образом, взвешенный слой шаровых частиц одинакового диаметра может существовать в пределах от  $\varepsilon = 0,4$  (при  $\omega_0 = \omega_{пс}$ ) до  $\varepsilon = 1$  (при  $\omega_0 = \omega_{ун}$ ). С некоторым приближением эти пределы можно принять и для частиц, имеющих форму многогранника. Для расчета аппаратов со взвешенным слоем необходимы уравнения, позволяющие определить значения скорости начала псевдооживления  $\omega_{пс}$  и скорости уноса  $\omega_{ун}$  в зависимости от свойств материала и газа. Такие эмпирические уравнения представляют в виде зависимостей между обобщенными безразмерными переменными, так называемыми критериями подобия, которые включают все физические величины, оказывающие влияние на рассматриваемый вопрос.

В гидравлике взвешенного слоя для определения  $\omega_{пс}$  и  $\omega_{ун}$  при  $0,4 \leq \varepsilon \leq 1$  используют зависимость

$$Re = \frac{Ar\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{Ar\varepsilon^{4,75}}}, \quad (13)$$

где критерий Рейнольдса равен

$$Re = \omega_0 d \rho / \mu_c, \quad (14)$$

а критерий Архимеда вычисляется по формуле

$$Ar = \frac{d^3 \rho (\rho_T - \rho) g}{\mu_c^2}. \quad (15)$$

### 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе экспериментально определяют порозность слоя, гидравлическое сопротивление слоя, скорость начала псевдооживления. Эти же величины определяют теоретически, результаты теории и эксперимента сравнивают между собой, обрабатывают в виде графиков в координатах  $\Delta P - \omega_0$ ,  $\varepsilon - \omega_0$ .

### 3.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка для изучения псевдооживленного слоя, схема которой представлена на рисунке 2, состоит из аппарата 1 со слоем зернистого материала, буферной емкости 3 для выравнивания пульсаций подачи воздуха, воздуходувки 4 для подачи воздуха в аппарат и приборов – ротаметра 2 для измерения расхода воздуха и дифманометра 5 для измерения гидравлического сопротивления слоя зернистого материала.

Аппарат с псевдооживленным слоем выполнен из стеклянной трубы, на которую нанесена шкала для измерения высоты слоя, и имеет решетку для поддержания зернистого материала. Количество поступающего воздуха регулируется краном 6.

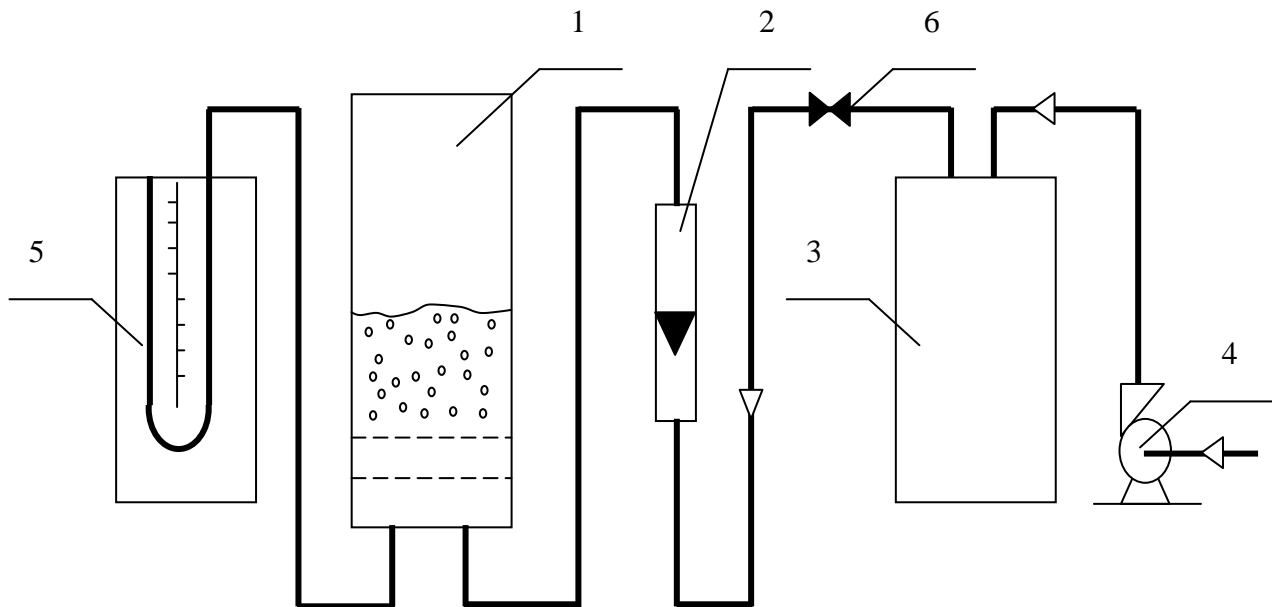


Рис. 2. Схема опытной установки:

1 – аппарат с зернистым слоем; 2 – ротаметр;  
3 – буферная емкость; 4 – воздуходувка; 5 – дифманометр;  
6 – регулирующий кран

### 3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Прежде чем приступить к выполнению работы, следует тщательно изучить устройство лабораторного стенда и правила техники безопасности (п. 4).

Перед началом опыта подготавливаются бланки с таблицами 1 и 2 ПРИЛОЖЕНИЯ для записей измеряемых величин.

По указанию преподавателя засыпают предварительно взвешенный зернистый материал. Слой зернистого материала следует уплотнить.

По шкале определяют высоту неподвижного слоя в аппарате и записывают в таблицу. Включают воздухоудку и краном устанавливают такой расход воздуха, чтобы поплавков ротаметра был на отметке «0». Записывают гидравлическое сопротивление слоя зернистого материала по показанию манометра.

Затем, открывая кран, увеличивают расход воздуха и записывают данные измеряемых величин: количество делений ротаметра, высоту зернистого слоя, сопротивление слоя и его поведение. Опыты проводят с шагом 3–6 делений ротаметра для неподвижного слоя и 15–20 делений для псевдоожиженного.

После достижения расхода воздуха, соответствующего 100 делениям ротаметра, опыты повторяют в обратной последовательности, уменьшая расход.

### 3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. С помощью градуировочного графика, изображенного на рисунке 3 ПРИЛОЖЕНИЯ, определяют расход воздуха.

2. Рассчитывают скорость воздуха в аппарате  $\omega_0$  по уравнению (1).

3. Опытное сопротивление слоя из миллиметров водяного столба переводят в паскалы (1 мм вод. ст. = 9,81 Па).

4. Вычисляют порозность неподвижного  $\varepsilon_n$  и псевдоожиженного слоя  $\varepsilon_{nc}$  по формулам (11) и (12).

5. Определяют расчетное гидравлическое сопротивление неподвижного слоя по уравнению (10), а взвешенного – по уравнению (7).

6. Оценивают отклонения полученных результатов эксперимента от расчетных

$$\gamma = \frac{|\Delta P_{\text{оп}} - \Delta P_{\text{рас}}|}{\Delta P_{\text{оп}}}.$$

7. Вычисляют критерий Архимеда по формуле (15).

8. Определяют критерии Рейнольдса по формуле (13):



а) при  $\varepsilon = \varepsilon_n$  для скорости начала псевдооживления;

б) при  $\varepsilon = 1$  для скорости уноса.

9. Рассчитывают скорость начала псевдооживления и скорость уноса по формуле (14).

10. Строят графические зависимости  $\Delta P = f(\omega_0)$ ,  $\varepsilon = f(\omega_0)$ .

11. Делают выводы по работе.

#### **4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

1. Перед работой все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности.

2. Все виды работ выполняются студентами только по указанию и под руководством преподавателя или лаборанта.

3. ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

а) оставлять без присмотра находящийся в работе стенд;

б) работать с незаземленным оборудованием;

в) производить исправления в электросхеме;

г) производить работы на оборудовании, не относящемся к данной работе.

#### **5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Отчет оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

- титульный лист установленной формы;
- кратко изложенные теоретические положения;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- таблицу измеренных величин;
- обработку результатов опыта;
- сопоставление результатов опыта и расчета;
- соответствующие графики;
- выводы по работе.

Чертежи, схемы и таблицы следует оформлять в соответствии со стандартами.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель работы.
2. Что такое фиктивная, действительная и критическая скорости газа?
3. Что такое порозность слоя?
4. Как изменяется порозность слоя с увеличением скорости газа?
5. Каковы условия перехода слоя в псевдооживленное состояние?
6. От чего зависит величина критической скорости и скорости уноса?
7. Почему с увеличением фиктивной скорости гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а взвешенного остается постоянным?
8. Какова зависимость между гидравлическим сопротивлением слоя и его весом?
9. Какие процессы проводят в псевдооживленном слое в химической технологии?
10. Каковы преимущества и недостатки проведения процессов в псевдооживленном слое?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: учебное пособие [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2008. – 608 с. – Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=98347](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=98347)
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – 11-е изд., перераб. – Москва: ООО ТИД «Альянс», 2014. – 753 с.
3. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.
4. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейн. – Москва: Логос; Высш. шк., 2002. Кн. 1. – 912 с.

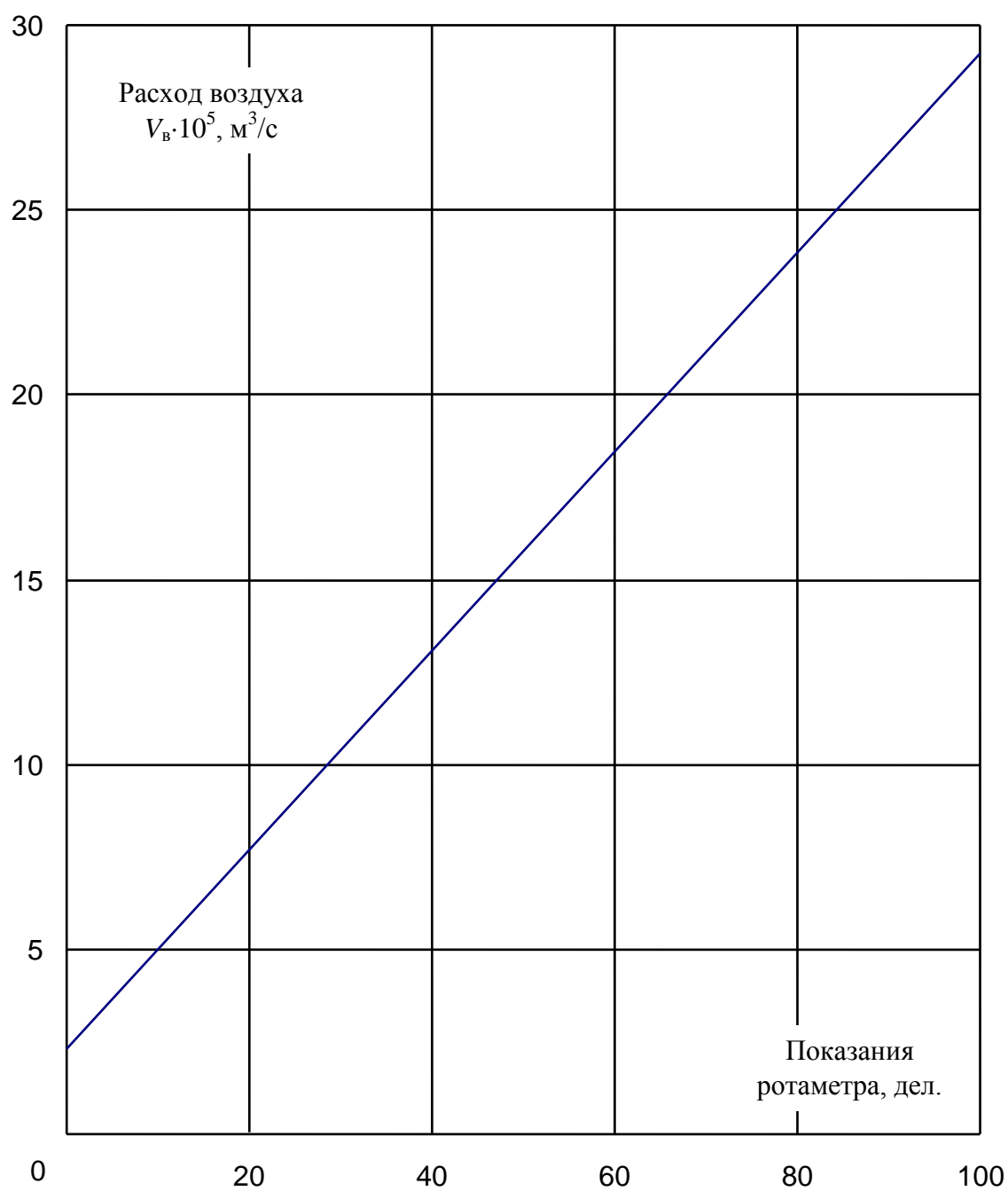
**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Рис. 3. Зависимость показаний ротаметра от расхода воздуха

Таблица 1

Номер замера	Характеристика зернистого материала				Диаметр аппарата $d_k$ , м	Показания ротаметра, дел.	Расход воздуха $V_{сек}$ , м <sup>3</sup> /с	Скорость воздуха в аппарате $\omega_0$ , м/с	Высота слоя материала $H$ , м	Опытное сопротивление слоя $\Delta P_{оп}$ , мм вод. ст.	Опытное сопротивление слоя $\Delta P_{оп}$ , Па	Расчетное сопротивление слоя $\Delta P_{рас}$ , Па	Порозность $\varepsilon$	Поведение зернистого слоя	Отклонения результатов $\gamma$ , %
	навеска $m$ , кг	плотность частицы $\rho_T$ , кг/м <sup>3</sup>	диаметр частицы $d$ , м	насыпная плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Таблица 2

Величины	Значения
Критерий Архимеда $Ar$	
Критерий Рейнольдса $Re$ при $\varepsilon = \varepsilon_n$	
$Re$ при $\varepsilon = 1$	
Скорость начала псевдоожижения $\omega_{пс}$	
Скорость уноса $\omega_{ун}$	

Составители  
Тиунова Наталья Владимировна,  
Изотов Николай Николаевич,  
Петрик Павел Трофимович,

## **ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ЗЕРНИСТОГО СЛОЯ ВОЗДУХОМ**

Методические указания к лабораторной работе № 6 по дисциплине  
**«Процессы и аппараты химической технологии»**  
для обучающихся направлений подготовки  
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии  
18.03.01 Химическая технология  
20.03.01 Техносферная безопасность  
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Рецензент Михайлов Геннадий Сергеевич

Подписано в печать 06.11.2018. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч-изд. л. 0,6.

Тираж 34 экз. Заказ .

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Бедного, 4а.