

**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**

**Составитель**  
**И. В. Дворовенко**  
**Е. Ю. Старикова**

## **ГРАВИТАЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ** **ШАРООБРАЗНЫХ ЧАСТИЦ**

**Методические указания к лабораторной работе № 7**  
**по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»**

Рекомендовано учебно-методическими комиссиями направлений  
подготовки 18.03.01 Химическая технология,  
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической  
технологии, нефтехимии и биотехнологии  
в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензент

Михайлов Г. С. – доцент кафедры энергоресурсосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях.

**Дворовенко Игорь Викторович,  
Старикова Елена Юрьевна.**

**Гравитационное осаждение шарообразных частиц:**  
методические указания к лабораторной работе № 7 по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» [Электронный ресурс] для обучающихся направлений подготовки 18.03.01 Химическая технология и 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии всех форм обучения / сост.: И. В. Дворовенко, Е. Ю. Старикова; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019.

Составлены с целью оказания методической помощи при выполнении лабораторной работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Содержат теоретические положения, методику выполнения работы и контрольные вопросы. Приведен список литературы.

© КузГТУ, 2019

© Дворовенко И. В.,  
Старикова Е. Ю.,  
составление, 2019.

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является изучение процесса гравитационного осаждения шарообразных частиц в различных жидкостях. Задачами исследования является изучение влияния вязкости жидкости и разности плотностей фаз на скорость осаждения.

На лабораторной установке студенты измеряют время осаждения частиц нескольких диаметров из различных материалов в различных средах, рассчитывают скорость осаждения, определяют режимы осаждения, анализируют влияние различных факторов на процесс. По результатам эксперимента делают выводы по работе.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

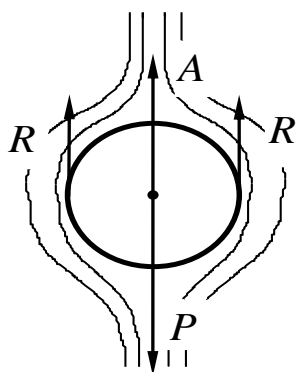


Рис. 1. Схема действия сил на частицу, движущуюся в неподвижной среде

Рассмотрим движение тела в жидкости на примере осаждения твердой частицы в неподвижной среде. При этом на тело будут действовать три силы (рис. 1): сила тяжести  $P$ , подъемная («Архимедова») сила  $A$  и сила сопротивления среды  $R$ .

$$P = mg ;$$

$$A = m_L g ;$$

$$R = \xi S \frac{\rho_L w^2}{2} ,$$

где  $m$  – масса тела (частицы), кг;

$m_L$  – масса жидкости в объеме, занимаемом частицей, кг;

$S$  – площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную направлению его движения, м<sup>2</sup>;

$w$  – скорость осаждения частицы, м/с;

$\rho_L$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\xi$  – коэффициент сопротивления среды.

Если тело (частица) имеет сферическую форму и его диаметр  $d$ , а плотность  $\rho$ , то тогда можно записать следующие выражения для сил, действующих на частицу:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\pi d^3}{6} \rho g ; \\ A &= \frac{\pi d^3}{6} \rho_L g ; \\ R &= \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L w^2}{2} . \end{aligned} \quad (1)$$

Если частица начинает падать под действием силы собственного веса, то скорость ее движения первоначально возрастает, а затем частицы движутся с постоянной скоростью. С увеличением скорости будет расти, согласно уравнению (1), сопротивление движению частицы и соответственно уменьшаться ее ускорение. В результате через короткий промежуток времени наступит динамическое равновесие: сила тяжести, под действием которой частица движется, будет равна силе сопротивления среды. Скорость  $w$  такого равномерного движения частицы в среде называют скоростью осаждения.

Скорость осаждения можно найти из условия: равнодействующая всех сил равна нулю

$$-P + A + R = 0 ,$$

или с учетом выражения (1)

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_L g + \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L w^2}{2} ,$$

откуда

$$w = \sqrt{\frac{4dg(\rho - \rho_L)}{3\xi\rho_L}} . \quad (2)$$

В выражение (2) входит коэффициент сопротивления  $\xi$ , зависящий от режима осаждения, определяемого по критерию Рейнольдса  $Re$

$$Re = \frac{wd\rho_L}{\mu_L} ,$$

где  $\mu$  – вязкость среды, Па·с.

При  $Re < 0,1$  имеет место ламинарный режим осаждения (область действия закона Стокса) [1]:

$$\xi = \frac{24}{Re},$$

при  $0,1 < Re < 1000$  – переходный режим:

$$\xi = \frac{10}{Re^{0,5}},$$

при  $Re > 1000$  – область развитой турбулентности (автомодельный режим),  $\xi$  не зависит от  $Re$ :

$$\xi = 0,44.$$

Подставляя указанные значения  $\xi$  в уравнение (2), находим выражения для скорости свободного осаждения частицы [1]:

– при ламинарном режиме

$$w = \frac{d^2 g (\rho - \rho_L)}{18 \mu_L} \quad (3)$$

– при переходном режиме

$$w = 1,2d \left[ \frac{\rho - \rho_L}{(\rho_L \mu_L)^{0,5}} \right]^{2/3} \quad (4)$$

– при турбулентном режиме

$$w = 5,45 \sqrt{\frac{d(\rho - \rho_L)}{\rho_L}}. \quad (5)$$

Для того, чтобы выбрать уравнение для расчета  $w$ , соответствующее данному режиму осаждения, необходимо предварительно знать значение критерия  $Re$ , в который входит искомая  $w$ . Поэтому предварительно скорость осаждения частицы рассчитывают следующим образом.

Уравнение (2) можно представить в безразмерной форме, выразив скорость  $w$  через критерий Рейнольдса и преобразовав его:

$$\xi Re^2 = \frac{4}{3} \frac{d^3 \rho_L^2 g}{\mu^2} \frac{\rho - \rho_L}{\rho_L} = \frac{4}{3} Ar, \quad (6)$$

где  $\frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{\rho - \rho_L}{\rho} = Ar$  – критерий Архимеда, т. е.  $\xi Re^2 = \frac{4}{3} Ar$ .

Таким образом, величина  $\xi Re^2$  не зависит от  $w$ , а является функцией только физико-механических свойств системы.

Поэтому для приближенного расчета скорости осаждения используют единую интерполяционную зависимость, связывающую критерии Рейнольдса  $Re$  и Архимеда  $Ar$ , для всех режимов осаждения, *формулу Тодеса* [1]:

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

Рассчитав предварительно значение критерия  $Ar$  по формуле

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_L) \rho_L g}{\mu_L^2}, \quad (8)$$

определяют величину критерия  $Re$  по формуле (7), а затем вычисляют скорость осаждения

$$w = \frac{Re \mu_L}{d \rho_L}. \quad (9)$$

Далее для сравнения рассчитывают скорость осаждения по одной из формул (3), (4) или (5) в зависимости от определенного режима осаждения.

### 3. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Лабораторная установка для изучения процесса гравитационного осаждения частиц (рис. 2) состоит из трех цилиндров 1, заполняемых различными жидкостями, в которых осаждаются частицы 2, таймера 3 для измерения времени осаждения частиц в каждом цилиндре, термометра 4 для измерения температуры среды. Цилиндры имеют шкалы 5, с помощью которых определяют путь, пройденный частицами. Каждый цилиндр имеет снизу зажим 6 и пробку 7, с помощью которых из цилиндров извлекаются шарики после проведения эксперимента. На установке изучается осаждение шариков различных диаметров из стекла, фарфора, полимера, стали, свинца.

Перед выполнением работы студенты должны знать теоретические положения изучаемого явления, ознакомиться с оборудованием лабораторной работы, изучить порядок проведения работы. До начала работы нужно подготовить бланк «Журнал наблюдений» (табл. 1) для записи измеряемых величин.

4.1. Штангенциркулем измерить диаметры всех шариков с точностью до 0,1 мм.

4.2. Термометром измерить температуру жидкостей в цилиндрах.

4.3. Каждый шарик осторожно опустить на поверхность жидкости ближе к центру цилиндра. При прохождении шариком верхней метки включить таймер и при достижении нижней метки таймер выключить.

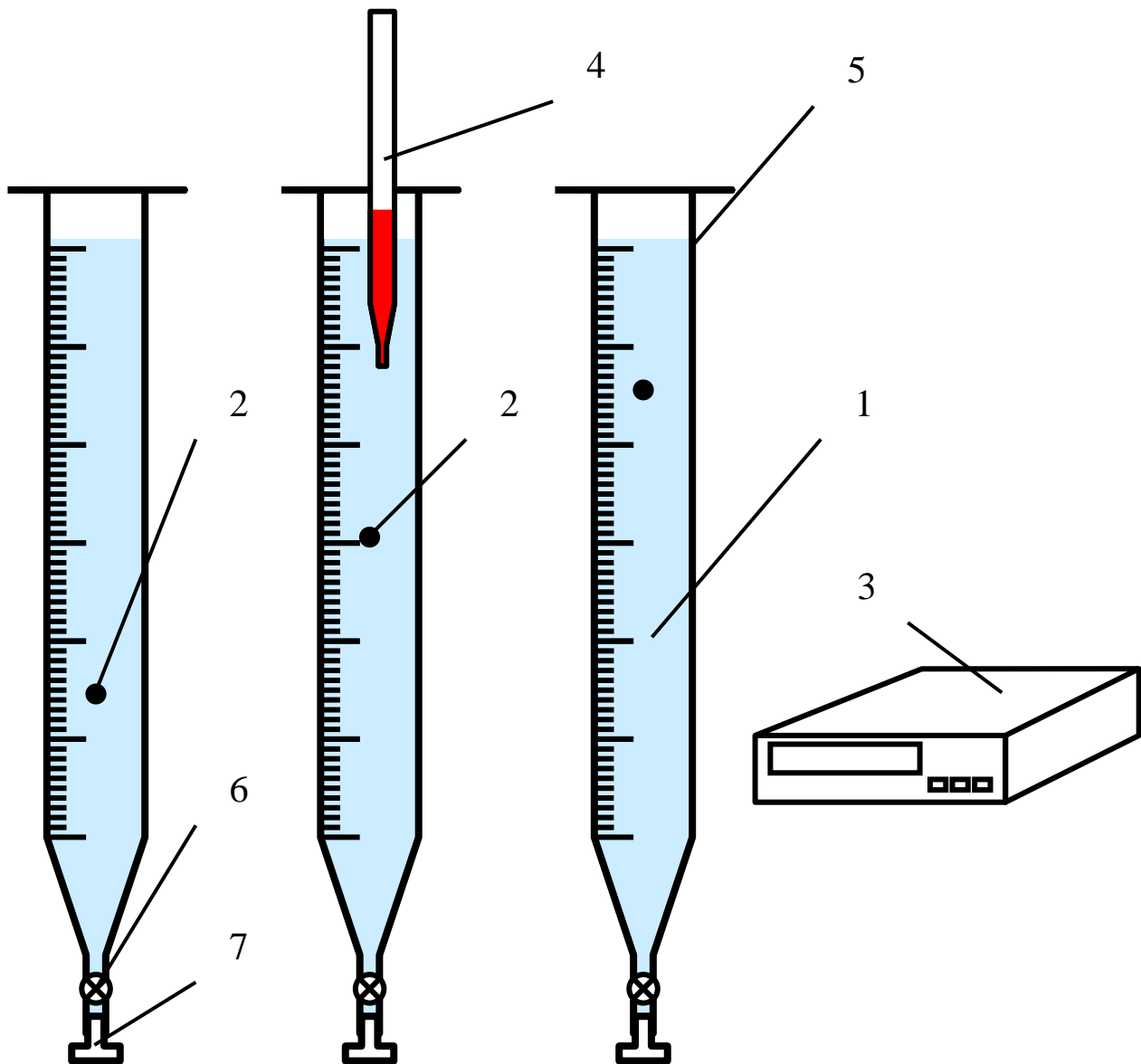


Рис. 2. Схема лабораторной установки

1 – цилиндры, 2 – частицы, 3 – таймер, 4 – термометр, 5 – шкала, 6 – зажим, 7 – пробка

Записать время  $\tau$  осаждения шарика. По шкале на цилиндре определить путь  $H$ , пройденный шариком

Опыт рекомендуется начинать с осаждения самых маленьких шариков в наиболее вязкой жидкости, число параллельных опытов – не менее трех. Полученные данные наблюдений занести в таблицу. Физико-химические свойства материалов и жидкостей определяются по справочным данным [2], [3], [4] и заносятся в таблицу.



## 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определить среднее время осаждения частиц

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{3}$$

2. Рассчитать скорость осаждения частиц по результатам опытов

$$w_{\text{оп}} = \frac{H}{\tau_{\text{ср}}},$$

где  $H$  – расстояние, пройденное частицей, м;

$\tau_{\text{ср}}$  – среднее время осаждения частицы, с;

$w_{\text{оп}}$  – экспериментальная скорость осаждения, м/с.

3. Определить значение критерия  $Ag$  по формуле (8).

4. Рассчитать критерий  $Re$  по формуле (7) и определить режим осаждения.

5. По формуле (9) приближенно рассчитать скорость осаждения частицы  $w$ .

6. По формуле (3) или (4), или (5) рассчитать теоретическую скорость осаждения  $w_T$  и найти расхождение между опытной  $w_{\text{оп}}$  и теоретической  $w_T$  скоростью осаждения по формуле

$$\Delta w = \frac{|w_{\text{оп}} - w_T|}{w_{\text{оп}}} 100 \, \%.$$

5. Результаты расчетов занести в таблицу.

6. По полученным данным построить графики зависимости скорости осаждения от величин, влияющих на процесс осаждения, согласно поставленной задачи исследования.

На основании проведенных исследований и выполненных расчетов сделать выводы по работе.

## 6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартами. Отчет должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) принципиальную схему установки;

- г) таблицу;
- д) примеры расчетов всех величин;
- е) графики зависимости скорости осаждения от свойств жидкостей и частиц;
- ж) выводы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель работы.
2. Баланс сил, действующих на частицу в процессе осаждения.
3. Коэффициент сопротивления среды, от чего он зависит.
4. Расчет скорости осаждения частицы. Как изменится скорость осаждения, если плотность частицы увеличить в два раза, если диаметр частицы уменьшить в два раза, если вязкость среды увеличить в два раза, если плотность среды уменьшить в два раза.
5. Как влияет температура жидкости на скорость осаждения?
6. В каком опыте наблюдался ламинарный режим и почему?
7. Для какого режима применима формула Стокса? Записать эту формулу?
8. Какие режимы осаждения существуют? Какие значения критерия Рейнольдса им соответствуют?
9. Что такое свободное и стесненное осаждение?
10. В каких процессах химической технологии используется осаждение? Достоинства и недостатки процесса осаждения.

## 8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Кн. 1. – Москва: Химия. 1981. – 384 с.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.
3. Справочник химика. Т. 5. – Москва, Ленинград: Химия. 1966. – 975 с.
4. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, В. Я. Хавин. – Ленинград: Химия. 1991. – 432 с.
5. Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Р. Некряч. – Киев: Наукова Думка. 1987. – 828 с.

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

№ п/п	Жидкость	Материал частиц	Высота осаднения $H$ , м	Диаметр частицы $d$ , м	Время осаднения, с				Температура среды $t$ , °C	Плотность жидкости, $\rho_L$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость жидкости, $\mu_L$ , Па·с	Плотность материала Частицы, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость осаднения $w_{оп}$ , м/с	Критерий $Ag$	Критерий $Re$	Режим осаднения	Скорость осаднения $w$ , м/с (ф. 9)	Скорость осаднения $w_T$ , м/с	$\Delta w$ , %
					$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_{ср}$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20