

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 27.01.2022 13:18:28  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb75e945df4a4851fda56d089

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра фундаментальной химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова  
« 27 » 2022 г.



**ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ**

Методические рекомендации по выполнению  
практической и самостоятельной работы  
для студентов направления подготовки 18.03.01

Курск 2022

УДК 531.001.362

Составитель: Лысенко А.В.

Рецензент

Кандидат педагогических наук, доцент *К. Ф. Янкив*

**Гидродинамическое подобие:** методические рекомендации по выполнению практической и самостоятельной работы для студентов направления подготовки 18.03.01 / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.В. Лысенко. - Курск, 2022. - 20 с.: ил., табл. 6. Библиогр.: 19 с.

Содержатся краткие теоретические положения об осаждении мелкодисперсных твердых частиц в газе или жидкости. Подробно рассмотрены режимы изменения коэффициента сопротивления. Представлено описание практических работ по определению размера осаждающихся частиц и осаждению твердых частиц в жидкости под действием силы тяжести. Приведены контрольные вопросы и тестовые задания для самостоятельной работы студентов.

Методические рекомендации соответствуют требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Предназначены для студентов направления подготовки 18.03.01.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *18.09*. Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз. Заказ *86* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Требования, предъявляемые к практическим работам	4
Теоретические положения	5
Практическая работа №1 Определение размера осаждающихся частиц	8
Контрольные вопросы	11
Практическая работа №2 Осаждение твердых частиц в жидкости под действием силы тяжести	12
Контрольные вопросы	14
Программа для тестирования	15
Список использованных источников	19
Приложение А - Зависимость критериев $Re$ и $Lu$ от критерия $Ag$ для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде	20

## **Требования, предъявляемые к практическим работам**

**Мотивация цели:** Изучение закономерностей обтекания потоком жидкости твердого тела. Определение экспериментальной и теоретической скорости осаждения частиц в жидкости.

**Цель самоподготовки:** для проведения работы студент должен знать:

1. Существующие режимы осаждения;
2. Понятие солидарного и свободного осаждения;
3. Критериальные уравнения осаждения.

### **План проведения лабораторного занятия:**

1. Контроль исходного уровня;
2. Выполнение лабораторной работы;
3. Обработка полученных данных;
4. Анализ полученных данных;
5. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные задания**

1. Оформить отчет в установленной форме;
2. Изучить и зарисовать схему экспериментальной установки.

## Теоретические положения

В случае осаждения мелкодисперсных твердых частиц в газе или жидкости, наблюдающемся при гидравлической и пневматической классификации, газоочистке и разделении суспензий, основной характеристикой процесса является **скорость осаждения  $\omega_{oc}$** .

Для расчета скорости осаждения под действием силы тяжести можно использовать общую для всех режимов осаждения зависимость:

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4 \cdot d_T (\rho_T - \rho) \cdot g}{3 \cdot \zeta \cdot \rho}}, \quad (1)$$

Экспериментально установлены три режима изменения **коэффициента сопротивления  $\zeta$**  в зависимости от числа Рейнольдса. В первой области - **ламинарного осаждения - при  $Re_{oc} < 2$** :

$$\zeta = \frac{24}{Re_{oc}}, \quad (2)$$

Во второй **переходной** области в пределах изменения  **$2 < Re_{oc} < 500$** :

$$\zeta = 18,5 Re_{oc}^{0,6}, \quad (3)$$

В третьей области - **развитой турбулентности** - в пределах изменения  **$500 < Re_{oc} < 20000$** :

$$\zeta \approx 0,44.$$

Зависимости (1) - (3) справедливы для осаждающихся одиночных сферических частиц диаметром  $d_T$ .

При ламинарном осаждении ( $Re_{oc} < 2$ ) для одиночной сферической частицы (принимая движение мелких частиц с  $d_T < 0,1$  мм равномерным) скорость осаждения рассчитывают по формуле:

$$\omega_{oc.cф} = \frac{d_T^2 (\rho_T - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (4)$$

Эта зависимость носит название **формулы Стокса**. Она справедлива для гидродинамической области чисел Рейнольдса.

Если  $10^{-4} < Re_{oc} < 2$  частицы имеют несферическую форму, то

пользоваться зависимостью (4) для расчета  $\omega_{oc}$  нельзя.

В общем случае можно использовать критериальную зависимость:

$$Re=f(Ar, \zeta). \quad (5)$$

Здесь  $Ar$  - **критерий Архимеда**:

$$Ar = \frac{d_T^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot (\rho_T - \rho)}{\mu^2 \cdot \rho} \quad (6)$$

С учетом зависимости (2) уравнение (5) примет вид:

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (7)$$

При этом критическое значение числа Архимеда, ограничивающее существование ламинарного режима, будет  $Ar \leq 36$ .

В переходной области зависимость (5) принимает вид:

$$Re=0,152Ar^{0,715} \quad (8)$$

Осаждение в переходной области ограничивается изменениями критерия Архимеда в пределах  $36 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$ .

При развитом турбулентном осаждении:

$$Re=1,74Ar^{0,5} \quad (9)$$

В тех случаях, когда скорость осаждения задана или известна, для расчета диаметра осаждающихся частиц удобно использовать графическую зависимость  $Ly=f(Ar)$  (рис. 1), где **критерий Лященко** равен:

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\omega_{oc}^3 \cdot \rho^2}{\mu (\rho_T - \rho) \cdot g} \quad (10)$$

В графической зависимости  $Ly=f(Ar)$  исключен коэффициент сопротивления  $\zeta$ , который для несферических (обычно обрабатываемых в химической технологии) частиц зависит от их формы (округлая, угловая, пластинчатая и т. д.).

Расчеты  $\omega_{oc}$  при известном  $d_T$  для любого режима осаждения приближенно можно вести также с помощью графика на рис. 1. Рассчитанная графически скорость осаждения хорошо совпадает с опытными данными для свободно осаждающихся частиц в неограниченном пространстве. Для частиц неправильной формы скорость

осаждения обычно меньше, и поэтому скорость, рассчитанную для сферической частицы, необходимо умножить (при отсутствии соответствующих графиков) на **поправочный коэффициент (фактор) формы  $\psi$** :

$$\omega_{oc} = \psi \cdot \omega_{oc.cф} \quad (11)$$

Значения коэффициента формы  $\psi$  для некоторых геометрических тел ( $h$  - высота;  $r$  - радиус) представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Значения коэффициента формы  $\psi$  для некоторых геометрических тел

Форма частиц	Фактор (коэффициент) формы, $\psi$
Шар	0,770
Куб	0,806
Цилиндр ( $h=3r$ )	0,860
Цилиндр ( $h=10r$ )	0,691
Цилиндр ( $h=20r$ )	0,580

При расчете скорости стесненного движения в формулу Стокса вводят поправочный множитель, учитывающий влияние концентрации суспензии и её реологические свойства.

## Практическая работа №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ОСАЖДАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

**Цель работы:** изучить закономерности отстаивания жидкостей, определить границы действия формулы Стокса для определения размера осаждающихся частиц песка различной крупности.

### Оборудование и реактивы

Цилиндр на 500 или 1000 мл; секундомер; линейка; микроскоп; электроплитка; термометр; вода дистиллированная; песок; набор сит.

### Описание установки

Установка представляет собой стеклянный цилиндр, заполненный дистиллированной водой. Физические свойства воды от температуры приведены в таблице 2 и 3.

Таблица 2 - Плотность воды в интервале температур от -10 до 95°C

t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>
-10	0,99815	25	0,99707	65	0,98059
-5	0,99930	30	0,99567	70	0,97781
0	0,99987	35	0,99406	75	0,97489
4	1,00000	40	0,99224	80	0,87183
5	0,99999	45	0,99025	85	0,96865
10	0,99973	50	0,98807	90	0,96534
15	0,99913	55	0,98573	95	0,96192
20	0,99823	60	0,98324	100	0,95838

Таблица 3 - Вязкость воды в интервале температур от -10 до 100°C

t, °C	$\mu$ , мПа·с	t, °C	$\mu$ , мПа·с	t, °C	$\mu$ , мПа·с
-10	-	25	0,8902	65	0,4339
-5	-	30	0,7973	70	0,4046
0	-	35	0,7191	75	0,3785
4	-	40	0,6527	80	0,3551
5	1,5193	45	0,5961	85	0,3341
10	1,3073	50	0,5471	90	0,3150
15	1,1383	55	0,5044	95	0,2978
20	1,0020	60	0,4670	100	0,2821

### Методика проведения работы

1. С помощью микроскопа и/или линейки исследовать форму частиц, определить размер частиц песка.
2. Заполнить цилиндр холодной водой. Измерить температуру воды и определить высоту столба в мм.
3. Всыпать в цилиндр небольшое количество песка и одновременно засечь секундомером время осаждения частиц (от начальной до конечной метки на цилиндре).
4. Используя время осаждения частиц, определить гидродинамическую крупность очень крупных (быстроосаждающих), крупных, средних и мелких частиц песка.
5. По полученным данным, используя формулу Стокса, определить диаметр частиц песка:
  - приняв, что они имеют форму шара - опыт 1;
  - с учётом коэффициента формы ( $\psi = 0,770$ , см. таблицу 1) - опыт 2.
6. Вычислить по формуле Стокса значения диаметра частиц. Сравнить результаты замеров с помощью микроскопа и/или линейки с экспериментальными данными, полученными при задерживании частиц песка в песколовках, представленными в таблице 4.

Таблица 4 - Зависимость между гидродинамической крупностью ( $u_0$ , мм/с) и диаметром частиц ( $d$ , мм) при осаждении в песколовке

$d$ , мм	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5
$u_0$ , мм/с	5,12	7,37	11,5	18,5	24,2	28,3	34,5	40,7	51,6

7. По полученным данным необходимо построить кривые:
  - зависимость диаметра осаждающихся частиц в мм (ордината  $y$ ) от времени осаждения в секундах (абсцисса  $x$ ).
  - изменение гидродинамической крупности в мм/с от диаметра частиц в мм (абсцисса  $x$ ).
8. Сделать вывод по каждому из полученных графиков. Объяснить полученные несоответствия данных, рассчитанных по формуле Стокса и полученных при осаждении в песколовке.

### Обработка результатов

По полученным экспериментальным данным по осаждению частиц разной крупности заполнить таблицу 5.

Таблица 5 - Экспериментальным данным по осаждению частиц разной крупности

Показатель	Опыт 1				Опыт 2				
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>
d, мм									
τ, сек									
u, мм/с									

Температура T H<sub>2</sub>O= ... °C

Вязкость μ H<sub>2</sub>O= ... мПа·с

Плотность ρ H<sub>2</sub>O= ... кг/м<sup>3</sup>

Высота столба h= ... см = ... м

Песок на 50% состоит из зерен кварца, поэтому при расчете можно пользоваться плотностью кварца (SiO<sub>2</sub>):

ρ SiO<sub>2</sub> = 2650 г/л=2650 кг/м<sup>3</sup>

Ускорение свободного падения g=9,80665 м/с<sup>2</sup>

Рассчитать гидродинамическую крупность по формуле:

$$u_1 = h / \tau_1 = \dots \text{ мм/с} = \text{ м/с},$$

где τ<sub>1</sub> – время осаждения очень крупных частиц, сек;

τ<sub>2</sub> – время осаждения крупных частиц, сек;

τ<sub>3</sub> – время осаждения средних частиц, сек;

τ<sub>4</sub> – время осаждения мелких частиц, сек

С помощью формулы Стокса, найти диаметр частиц:

- для опыта 1;

- для опыта 2 с учётом коэффициента формы по формуле:

$$\omega_{oc} = u' = \psi \cdot \omega_{oc.cф}$$

### Контрольные вопросы

1. Какие процессы называются гидромеханическими?
2. Назовите основные режимы течения потоков.
3. Методы разделения неоднородных систем; сущность и движущая сила этих методов.
4. Что называется процессом осаждения? Ознакомьтесь с теоретическими основами процессов осаждения частиц под действием силы тяжести.
5. Скорость стесненного осаждения.
6. Какие силы действуют на твердую частицу в потоке газа или жидкости?
7. Из каких фаз состоит неоднородная система и как осуществляется классификация неоднородных систем по агрегатному состоянию и размеру частиц?
8. Критериальное уравнение процесса отстаивания.
9. Применение формулы Стокса для прогнозирования процессов осаждения
10. Что называется критерием Рейнольдса? Каков его физический смысл?
11. Что такое коэффициент формы?
12. Для чего предназначены песколовки? Принцип действия и виды песколовков.
13. Процесс осаждения взвесей в горизонтальных и вертикальных отстойниках
14. Формулы и физический смысл критериев Рейнольдса и Архимеда.
15. Сила сопротивления при оседании одиночных частиц

## **Практическая работа №2**

### **ОСАЖДЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ**

**Цель работы:** экспериментальное определение скорости осаждения твердых частиц в жидкостях в зависимости от диаметра частиц, их формы и физических свойств частицы и жидкости; построение экспериментальных зависимостей  $Re=C \cdot Ar^n$  и  $Ly=f(Ar)$  для различных режимов осаждения; сравнение расчетных и теоретических.

#### **Описание установки**

Установка состоит из трех стеклянных цилиндров ( $d_r \geq 50$  мм), заполненных водой разной температуры (холодной (-10 ... 20°C), средней (30 ... 60°C), горячей (80 ... 90°C)). Физические свойства воды от температуры приведены в таблице 2 и 3. Вверху и внизу каждого цилиндра сделать метки, фиксирующие расстояния, которые частицы проходят в процессе осаждения. Замеряя секундомером время, в течение которого частица проходит расстояние между метками, можно определить скорость осаждения частицы.

С целью исключения влияния начального участка ускоренного движения частицы в жидкости верхняя метка расположена на 30-40 мм ниже уровня поверхности жидкости.

#### **Методика проведения работы**

Частицы сферической и неправильной формы известного или замеренного диаметра (или необходимых геометрических размеров) вводят в сосуд над поверхностью жидкости и аккуратно опускают в жидкость. Секундомером фиксируют время прохождения частицы между метками. Каждый замер дублируют. Результаты опытов заносят в отчетную таблицу 6.

Таблица 6 – Отчетная таблица

№ п/п	Частица		Жидкость			Время осаждения частицы $\tau$ , с	Скорость осаждения, м/с		Re	Ar	Ly	$\psi$
	$d_T$ , мм	$\rho, \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	t, °C	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , мПа·с		$\omega_{oc}$	$\omega_{oc.cф}$				
1												
2												
...												
n												

При вычислении критериев Re, Ar и Ly используют усредненные значения скорости осаждения  $\omega_{oc}$  и диаметра частиц  $d_T$ .

Для определения скорости осаждения  $\omega_{oc}$  следует провести не менее 5 опытов, в каждом по 3-4 замера.

Если частица в процессе осаждения коснулась стенки цилиндра или к осаждающейся частице прилип пузырек воздуха, результат такого опыта не следует учитывать и опыт необходимо повторить. Для чистоты эксперимента опыт проводят, начиная с горячей воды, измеряя температуру жидкости перед опытом.

### Обработка опытных данных и составление отчета

На основе экспериментальных данных:

1. Вычисляют скорость осаждения в каждом замере.
2. Определяют значения критериев Re, Ar и Ly для каждого опыта.
3. Строят экспериментальные зависимости  $Re=C \cdot Ar^n$  и находят коэффициенты  $C$  и  $n$ .

Сравнивают полученные зависимости с расчетными формулами (6) - (9).

4. Наносят экспериментальные данные на график  $Ly=f(Ar)$ .

5. Вычисляют с помощью зависимости  $Ly=f(Ar)$  и известной скорости осаждения фактор формы  $\psi$  для заданных некруглых частиц и сравнивают с приведенными выше данными.

6. Порядок определения скорости осаждения по критерию Архимеда (Ar).

### Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на осаждающуюся частицу?
2. Какие физические величины входят в число Рейнольдса для осаждающихся частиц?
3. Какие режимы осаждения известны?
4. Как определить скорость осаждения для несферических частиц?
5. Как определить диаметр частиц, если известна их скорость осаждения?
6. Как влияет несферичность осаждающихся частиц на зависимость  $Lu=f(Ar)$ ?
7. С помощью какой графической зависимости можно вести приближенные расчеты  $\omega_{oc}$  или  $d_T$  для любого режима осаждения?
8. Как можно учесть стесненность движения при расчете  $\omega_{oc}$ ?
9. Как рассчитать площадь осаждения в отстойниках, пылевых камерах, циклонах и осадительных центрифугах?
10. Солидарное и свободное осаждение.
11. Определение скорости осаждения методом приближений.
12. Определение скорости осаждения методом Лященко.
13. Кинетическая кривая осаждения.
14. Конструкции отстойников.
15. Критериальные уравнения осаждения.

## ПРОГРАММА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

**1. Какое уравнение используется для определения частных коэффициентов скорости абсорбции для газовой фазы ...**

- а.  $K_{\Gamma} = f_1 \frac{D_{\Gamma}}{d} \text{Re}_{\Gamma}^k \text{Pr}_{\Gamma}^l \left(\frac{d}{h}\right)^m$  ;
- б.  $K_{\Gamma} = f_2 \frac{D_2}{d} \text{Re}_{\Gamma}^k \text{Pr}_{\Gamma}^l \left(\frac{d}{h}\right)^q$  ;
- в.  $K_{\Gamma} = \varphi \frac{D_2}{d} \text{Re}_t \text{Pr}_t \left(\frac{d}{h}\right)^t$  ;
- г.  $K_{\Gamma} = f_2 \frac{D_2}{d} \text{Re}_t \text{Pr}_t \left(\frac{d}{h}\right)^t$  .

**2. Какую величину можно найти с помощью уравнения ...**

$$K = \frac{1}{\frac{1}{f_1 \frac{D_{\Gamma}}{d} \text{Re}_{\Gamma}^k \text{Pr}_{\Gamma}^l \left(\frac{d}{h}\right)^m \cdot \frac{3600M}{22,4 \cdot 760}} + \frac{1}{f_2 \frac{D_{\text{ж}}}{d} \text{Re}_{\text{ж}}^n \text{Pr}_{\text{ж}}^p \left(\frac{d}{h}\right)^q \frac{3600H}{760}}}$$

- а. общий коэффициент абсорбции;
- б. число Рейнольда для газа;
- в. кинематическую вязкость жидкости;
- г. константу Генри.

**3. В чем измеряется коэффициент диффузии?**

- а.  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм.рт.ст.}$ ;                      б.  $\text{мм рт.ст.}$ ;
- в.  $\text{м}^2/\text{сек.}$ ;    г.  $\text{Па.}$ ;

**4. Число Рейнольдса для жидкости можно найти...**

- а.  $\text{Re} = \frac{w_{\Gamma} d}{\nu_{\text{ж}}}$ ;    б.  $\text{Re} = \frac{w_{\text{ж}} d}{\nu_{\text{ж}}}$  ;
- в.  $\text{Re} = \frac{w_{\Gamma} d}{D_{\text{ж}}}$  ;    г.  $\text{Re} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}}$  .

**5. Число Прандтля для газа определяется по формуле...**

- а.  $\text{Pr}_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma} d}{\nu_{\Gamma}}$  ;    б.  $\text{Pr}_{\Gamma} = \frac{w_{\text{ж}} d}{\nu_{\text{ж}}}$  ;
- в.  $\text{Pr}_{\Gamma} = \frac{\nu_{\Gamma}}{D_{\Gamma}}$  ;    г.  $\text{Pr}_{\Gamma} = \frac{\nu_{\Gamma}}{D_{\text{ж}}} d$  .

**6. Критерий Сантона (St) равен ...**

- а.  $Nu/(Re \cdot Pr)$ ; б.  $\frac{q}{\Delta t \gamma \omega_0 c_p}$ ;  
 в.  $\frac{\alpha}{\gamma \omega_0 c_p}$ ; г.  $\omega_0/k_0$ .

**7. Скорость звука в газе при температуре  $t_{cp}$  равна ...**

- а.  $a_0 = \sqrt{\gamma t_{cp}}$ ; б.  $a_0 = \sqrt{\gamma R I_{cp}}$ ;  
 в.  $a_0 = \sqrt{\gamma R t_{cp}}$ ; г.  $a_0 = \sqrt{R t_{cp}}$ .

**8. Если произведение  $Gr \cdot Pr > 10^9$ , то критерий Нуссельта для газов равен ...**

- а.  $Nu = 0,17 Gr^{1/3} \cdot Pr^{1/3}$ ; б.  $Nu = 0,56 Gr^{1/4} \cdot Pr^{1/4}$ ;  
 в.  $Nu = 0,47 Gr^{1/4} \cdot Pr^{1/4}$ ; г.  $Nu = 0,12 Gr^{1/3} \cdot Pr^{1/3}$ .

**9. Обратное число Рейнольдса можно найти по формуле ...**

- а.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\gamma d^2}$ ; б.  $\pi_2 = \frac{n}{\gamma \mu d^2}$ ;  
 в.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\gamma n d^2}$ ; г.  $\pi_2 = \frac{\mu}{\gamma n d}$ .

**10. Формула коэффициента расхода энергии...**

- а.  $\pi_1 = \frac{N}{\gamma n^2 d^5}$ ; б.  $\pi_1 = \frac{N}{\gamma n^3 d^5}$ ; в.  $\pi_1 = \frac{N}{\gamma n^3 d}$ ; г.  $\pi_1 = \frac{\gamma N}{n^3 d^5}$ .

**11. Теория подобия – это ...**

а. наука, где естественный или искусственный объект, находится в соответствии с изучаемым объектом или с какой-либо из его сторон;

б. наука о подобии процессов;

в. учение о подобии явлений;

г. учение, выражающие отношение различных одноименных величин в объекте и модели.

**12. Треугольники подобны, если ...**

а. их соответственные углы равны, а сходственные стороны пропорциональны;

б. если их соответственные углы пропорциональны, а сходственные стороны равны;

в. если их соответственные углы и сходственные стороны равны;

г. если их соответственные углы сходственные стороны пропорциональны.

**13. Математическая формулировка геометрического подобия двух треугольников...**

а.  $\frac{l_1'}{l_1} = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{l_3'}{l_3} = A$ ;

б.  $\frac{l_1}{l_1'} = \frac{l_2}{l_2'} = \frac{l_3}{l_3'} = A$ ;

в.  $\frac{l_1'}{l_1} = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{l_3'}{l_3} = 1$ ;

г.  $\frac{w'}{w} = Aw$ .

**14. Инварианта подобия обозначаются символом ...**

а. i; б. r; в. a; г. y;

**15. Симплексами подобия называются инварианты подобия, являющиеся отношением ...**

- а. простых однородных величин;
- б. сложных однородных величин;
- в. простых неоднородных величин;
- г. сложных неоднородных величин.

**16. Критерии подобия могут быть ...**

- а. комплексными и простыми;
- б. простыми и сложными;
- в. основными и производными;
- г. определяющими и неопределяющими.

**17. Критериями подобия могут называются инварианты подобия, выраженные ...**

- а. более сложными безразмерными отношениями, составленными из нескольких простых параметров;
- б. более сложными размерными отношениями, составленными из нескольких простых параметров;
- в. более сложными безразмерными отношениями, составленными из нескольких сложных параметров;
- г. сложными безразмерными отношениями, составленными из нескольких простых величин.

**18. Критерии, содержащие искомую величину, называются ...**

- а. неопределяющими;
- б. определяющими;
- в. побочными;
- г. искомыми.



**Список использованных источников**

1. Гумеров А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов. М.: Колос, 2008. - 159 с.

2. Скатецкий В.Г., Свиридов Д.В., Яшкин В.И. Математические методы в химии: М.: ТетраСистемс, 2006. - 368 с.

3. Захарова А.А. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Академия, 2006. - 528 с.

4. Дытнерский Ю.И. «Процессы и аппараты химической технологии» Часть 1. М.: Химия, 1995. – 368 с.

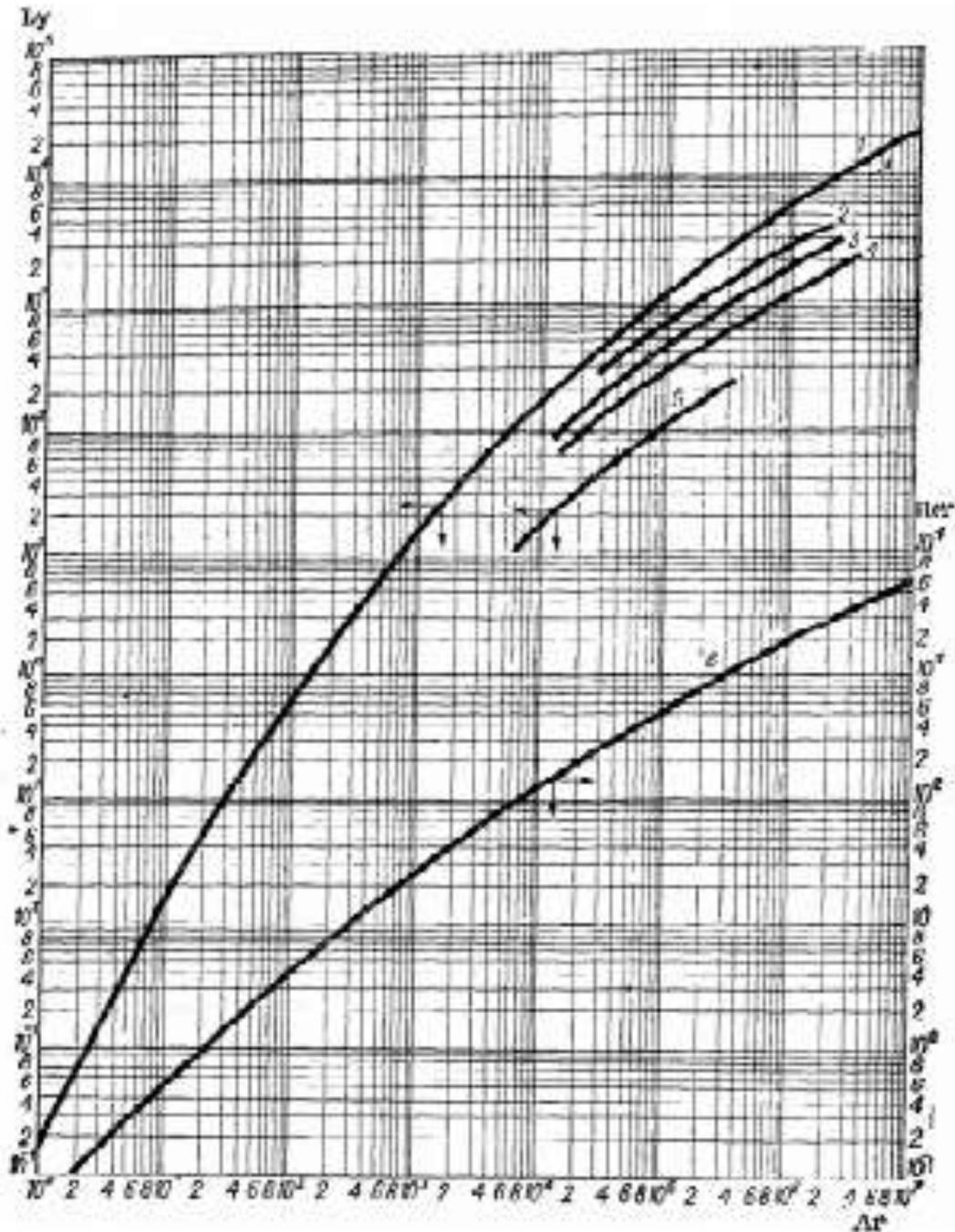
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: 1981, 560 с.

6. Расчет процессов и аппаратов для проведения абсорбции и хемосорбции: методические указания к самостоятельной и индивидуальной работе / сост. Е.Н. Розанова. Курск: КГТУ, 2008. - 23 с.

7. Расчет процессов переноса тепла в химической технологии [эл. ресурс]: методические указания к индивидуальным и практическим работам / сост. Е.Н. Розанова. Курск: КГТУ, 2009. - 39 с.

### Приложение 1

Зависимость критериев  $Re$  и  $Lu$  от критерия  $Ar$  для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде



1 и 6 – шарообразные частицы; 2 – округленные; 3 – угловатые;  
4 – продолговатые; 5 – пластинчатые