

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра Механизации животноводства и переработки  
сельскохозяйственной продукции

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПЕРРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Рабочий журнал**  
для выполнения лабораторных работ

Ф.И.О. \_\_\_\_\_

группа \_\_\_\_\_

Новосибирск 2023

Кафедра механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной  
продукции

Процессы и аппараты перерабатывающих производств /Журнал для выполнения лабораторных работ/ Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; Сост.: Е.А. Пшенов, А.А. Мезенов, М.Н. Мефодьев. – Новосибирск, 2023-36 с.

Рецензент: к.т.н. Е.А. Булаев

Рабочий журнал предназначен для студентов очной и заочной формы обучения по направлению: Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции.

Утвержден и рекомендован к изданию учебно-методическим советом Инженерного института НГАУ

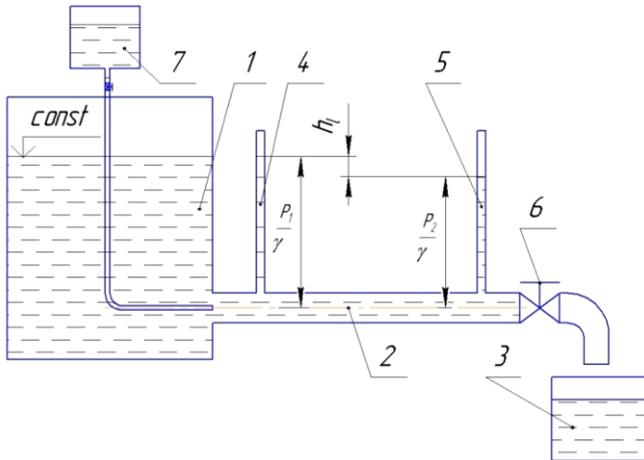
© Новосибирский государственный  
аграрный университет, 2023  
© Инженерный институт, 2023

## Лабораторная работа № 1

### Определение критического значения числа ( $Re_{кр}$ )

#### Цель работы:

- наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения воды в стеклянной трубке;
- измерение потерь напора на преодоление трения по длине стеклянной трубки;
- нахождение критического значения скорости  $V_{кр}$ ;
- вычисление критического числа Рейнольдса –  $Re_{кр}$



**Рис. 1.1 – Схема экспериментальной установки:**

1 – напорный резервуар; 2 – стеклянная трубка; 3 – мерный бак; 4, 5 – пьезометрические трубки; 6 – регулировочная задвижка; 7 – бачок с краской;  $P_1, P_2$  – гидростатическое давление в начале и конце трубки;  $\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$  – пьезометрические напоры.

Таблица 1.1 – Данные проведенных опытов

Наименование характеристик	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Время опыта, t, с	60	60	60	40	30	20
Объем воды поступившей в мерный бак, W, см <sup>3</sup> ( $h \cdot 135 \text{ см}^2$ )						
Температура воды, t, °C						
Показания пьезометра 4, $\frac{P_1}{\gamma}$ , мм						
Показания пьезометра 5, $\frac{P_2}{\gamma}$ , мм						

### Порядок выполнения работы

1. Величина расхода  $Q$  определяется мерным способом при помощи мерного бака 3:

$$Q = \frac{W}{t}, \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \right] \quad (1.1)$$

где:  $W$  – объем жидкости, поступившей в мерный бак за время опыта,  $\text{см}^3$ .

2. Средняя скорость движения жидкости  $V$  определяется по формуле:

$$V = \frac{Q}{\omega}, \left[ \frac{\text{см}}{\text{с}} \right] \quad (1.2)$$

где:  $\omega$  - площадь сечения стеклянной трубки,  $\text{см}^2$ .

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 [\text{см}^2] \quad (1.3)$$

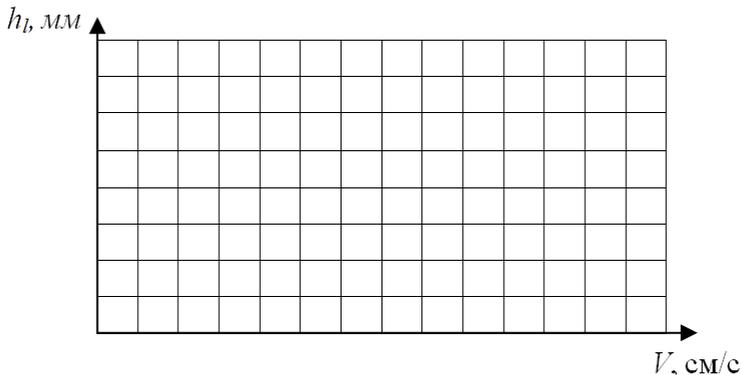
3. Величину потерь напора  $h_l$ , затраченные на преодоление трения по длине трубки, определим по формуле:

$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}, [\text{мм}] \quad (1.4)$$

Таблица 1.2 – Расчетные значения.

Наименование характеристик	№ опыта					
	1	2	3	4	5	6
Расход воды в опыте $Q$ , $\text{см}^3/\text{с}$						
Площадь живого сечения трубки $\omega$ , $\text{см}^2$	3,14					
Средняя скорость движения воды, $V_{\text{ср}}$ , $\text{см}/\text{с}$						
Кинематический коэф. вязкости, $\nu$ , $\text{см}^2/\text{с}$						
Потери напора, $h_l$ , мм						

По значениям величин  $h_l$  и  $V_{\text{ср}}$ , строится график  $h_l = f(V_{\text{ср}})$ , и определяется критическая скорость  $V_{\text{кр}}$ .



По значению  $V_{кр}$ , определенному по графику  $h_l = f(V_{кр})$ , вычисляется  $Re_{кр}$  по формуле:

$$Re = \frac{V_{кр} \cdot d}{\nu} \quad (1.5)$$

где:  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,  $см^2/с$ .

Таблица 1.3 – Значения  $\nu$  воды в зависимости от температуры.

t, °C	5	10	15	20	25	30
$\nu, см^2/с$	0,015	0,013	0,011	0,010	0,009	0,008

Полученное опытным путем значение  $Re_{кр}$  сравниваем с общеизвестным и делаем вывод.

Вывод: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_

## Лабораторная работа № 2

### Изучение кинетики гравитационного осаждения

**Цель работы:** Изучение теории осаждения частиц шарообразной формы в жидкой среде. Экспериментально определить скорости осаждения частиц. Определить константы основного уравнения отстаивания и коэффициента сопротивления среды системы «жидкость-твердое тело». Обработать и обобщить экспериментальные данные.

**Оборудование:** лабораторная установка с стеклянными цилиндрами заполненная водой, маслом и глицерином, секундомер, весы лабораторные ВМ 512, штангельциркуль.

### Основные определения и теория процесса

В химической технологии многие процессы приводят к образованию неоднородных систем. Такими системами являются пыли – взвеси частиц твердого вещества в газе; туманы – взвеси мелких капель жидкости в газе; эмульсии – взвеси капель жидкости в других жидкостях; суспензии – взвеси твердых частиц в жидкости.

Для дальнейшей обработки возникает необходимость разделения таких систем.

Разделение неоднородных систем может быть осуществлено различными методами, в том числе путем гравитационного осаждения.

Гравитационное осаждение (отстаивание) является простейшим методом разделения, отличающимся малыми энергозатратами. Аппараты

для проведения этого процесса называют отстойниками. Расчет геометрических размеров отстойника требует знания скорости осаждения частиц.

Рассмотрим процесс осаждения твердой шарообразной частицы диаметром  $d$ , плотность которой  $\rho_T$ , в жидкости с плотностью  $\rho_{ж}$ .

В данном случае примем  $\rho_T > \rho_{ж}$ .

Если частицу вводят в жидкость и начальная скорость ее движения будет равна нулю, то она вначале будет двигаться ускоренно, и баланс сил, действующих на нее (рис. 2.1), можно представить уравнением

$$G - A - R = J, \quad (2.1)$$

где:  $G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho_T \cdot g$

$G$  – сила тяжести, действующая на частицу;

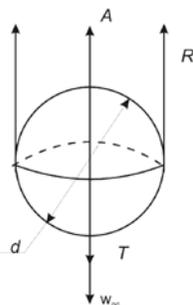


Рис. 2.1 Силы, действующие на частицу, осаждающуюся в гравитационном поле

$$A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \rho_{ж} \cdot g$$

$A$  – выталкивающая сила, равная по закону

Архимеда весу объема вытесненной частицей жидкости;

$$R = \varphi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \frac{\omega_{oc}^2}{2} \rho_{ж}$$

$R$  – сила сопротивления, отнесенная к поперечному сечению частицы

$$J = m \frac{d\omega_{oc}^2}{d\tau} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_T \frac{d\omega_{oc}}{d\tau}$$

$J$  – сила инерции.

Здесь:  $m$  – масса частицы;  $\varphi$  – коэффициент сопротивления;  $w_{oc}$  –

скорость осаждения частицы;  $\tau$  – время.

С увеличением в начальный момент скорости возрастает сила сопротивления, которая уменьшает ускорение частицы. Через некоторый момент времени можно считать ускорение практически равным нулю.

При условии постоянства скорости осаждения уравнение (1.1) действующих на частицу сил будет иметь вид

$$G - A - R = 0. \quad (1.2)$$

Можно с достаточной для технических расчетов точностью период движения частицы с ускорением исключить из дальнейшего рассмотрения, так как начальный промежуток времени движения с ускорением мал по сравнению с общей длительностью процесса осаждения.

С учетом этого обстоятельства уравнение (1.2) можно записать в развернутом виде

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_T g - \frac{\pi d^3}{6} \rho_{ж} g - \varphi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\omega_{oc}^2}{2} \rho_{ж} = 0 \quad (1.3)$$

Из уравнения (2.3) можно получить скорость осаждения

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4(\rho_T - \rho_{ж})dg}{3\rho_{ж}\varphi}} \quad (1.4)$$

Скорость осаждения твердой частицы непосредственно из уравнения (2.4) рассчитать нельзя, так как неизвестно значение коэффициента сопротивления  $\varphi$ , который зависит от режима осаждения.

Исследования показывают, что можно выделить три режима осаждения: ламинарный, переходный и турбулентный. Каждый режим осаждения имеет свой характер обтекания твердой частицы жидкостью.

Область существования того или иного режима осаждения определяют величиной критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_{oc} d \rho_{ж}}{\mu_{ж}} \quad (1.5)$$

где  $\mu_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости жидкости.

При малых числах  $Re$  жидкость плавно «обтекает» частицу без образования вихрей в кормовой части. Коэффициент сопротивления в этой области описывают уравнением

$$\varphi = \frac{24}{\text{Re}} \quad (2.6)$$

Эта зависимость хорошо аппроксимирует опытные данные при  $\text{Re} \leq 1,85$ . В этой области сила сопротивления определяется, в основном, сопротивлением трения на поверхности частицы, и она пропорциональна первой степени скорости.

Вторая область – область переходного режима осаждения частицы – лежит в пределах изменения  $1,85 < \text{Re} < 500$ .

С увеличением числа  $\text{Re}$  в кормовой части осаждающейся частицы образуется зона, в которой существует замкнутое циркуляционное (вихревое) движение. Пока значения числа  $\text{Re}$  невелики, вихри устойчивы. При дальнейшем увеличении числа  $\text{Re}$  возрастает интенсивность движения вихрей, течение становится неустойчивым и начинает наблюдаться периодический срыв вихрей с поверхности частицы, которые образуют вихревой след. Если в начале переходной области основная часть сопротивления приходится на силы трения, то в конце основную часть составляет лобовое сопротивление.

Коэффициент сопротивления в этой области может быть рассчитан по уравнению

$$\varphi = \frac{18.5}{\text{Re}^{0.6}} \quad (2.7)$$

При увеличении числа  $\text{Re}$  выше 500 коэффициент сопротивления остается практически постоянным, не зависящим от числа  $\text{Re}$  (автомодельная область).

В этом случае в кормовой части частицы наблюдается регулярный отрыв вихрей. Такой режим осаждения называется турбулентным. Сила сопротивления в этом случае пропорциональна скорости во второй степени. Коэффициент сопротивления определяется, в основном, лобовым сопротивлением и составляет

$$\varphi = 0,44 \quad (2.8)$$

Используя уравнение (2.4) и уравнения (2.6)–(2.8), можно определить скорость осаждения методом последовательных приближений. Сопоставляя полученное значение  $w_{oc}$  с предварительным, повторяют расчет до получения необходимой точности.

Неудобства и трудоемкости такого расчета можно избежать, преобразовав уравнение (1.4) в критериальное. Для этого из уравнения (2.4) определим  $\varphi$  как функцию остальных параметров

$$\varphi = \frac{4(\rho_T - \rho_{жс})gd}{3\rho_{жс}\omega_{ос}^2} \quad (2.9)$$

Умножим левую и правую части на  $Re^2$ , после преобразований получим выражение

$$\varphi Re^2 = \frac{4(\rho_T - \rho_{жс})gd^3\rho_{жс}}{3\mu_{жс}^2} \quad (2.10)$$

Безразмерный комплекс в правой части является критерием Архимеда

$$Ar = \frac{(\rho_T - \rho_{жс})gd^3\rho_{жс}}{\mu_{жс}^2} \quad (2.11)$$

Из уравнения (1.10) получаем

$$Re = 1,15 \left( \frac{Ar}{\varphi} \right)^{0.5} \quad (2.12)$$

Подставляя в уравнение (2.12) значение  $\varphi$  из уравнений (2.6)–(2.8), получим критериальные уравнения для расчета скорости осаждения.

Для нахождения скорости осаждения сначала по известному диаметру частиц находят критерий Архимеда, затем графически либо по интерполяционной формуле для всех областей осаждения находят критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (2.13)$$

Для различных режимов существуют также следующие критериальные зависимости:

В ламинарном режиме

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (2.14)$$

В переходном режиме

$$Re = 0.152Ar^{0.715} \quad (2.15)$$

В турбулентном режиме

$$Re = 1.74Ar^{0.5} \quad (2.16)$$

Режим осаждения частицы можно определить и по значению критерия Архимеда.

Так, верхней границей ламинарного режима осаждения служит значение  $Re = 1,85$ , что соответствует значению  $Ar = 33$ .

Следовательно, при выполнении условия  $33 \leq Ar$  имеет место ламинарный режим осаждения. Верхнее предельное значение критерия Архимеда для переходного режима, соответствующее значению  $Re = 500$ , определяется по уравнению (1.14) и равно  $8,3 \cdot 10^4$ .

Переходный режим осаждения ограничивается изменением значений критерия  $Ar$  в следующих пределах

$$33 < Ar < 8,3 \cdot 10^4 .$$

Турбулентный режим осаждения возможен при  $Re > 500$  или при  $Ar > 8,3 \cdot 10^4$ .

Удобство расчета по уравнениям (1.13) – (1.16) заключается в том, что неизвестная величина  $w_{oc}$  входит в определяемый критерий, а параметры, входящие в определяющий критерий  $Ar$ , обычно известны по условиям задачи ( $d$ ,  $\rho_T$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $\mu_{ж}$ ). Установив значение  $Ar$ , можно судить о режиме осаждения. Используя необходимое уравнение из (1.13) – (1.15), находим значение  $Re$ , а затем скорость осаждения

$$\omega_{oc} = \frac{Re \mu_{ж}}{d \rho_{ж}} \quad (2.17)$$

Для случая ламинарного осаждения уравнение (2.13) после несложных преобразований приводится к виду

$$\omega_{oc} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_T - \rho_{ж})gd^2}{\mu_{ж}} \quad (2.18)$$

Эта формула носит название формулы Стокса.

Для определения скорости осаждения частиц неправильной формы необходимо учитывать отклонение формы от сферической, введя в расчет коэффициент формы  $\psi$ .

Коэффициент формы  $\psi$  представляет собой отношение поверхности частицы сферической формы  $f_{ш}$  поверхности частицы произвольной формы  $f_{ч}$  того же веса (объема).

Для сферических частиц  $\psi = 1$  (так как  $f_{ш} = f_{с}$ ), а для частиц любой иной формы  $\psi < 1$ .

С учетом коэффициента  $\psi$  уравнения (1.14) – (1.16) имеют

Вид

$$Re = \frac{\psi Ar}{18} \quad (2.19)$$

$$Re = 0.152(\psi Ar)^{0.715} \quad (2.20)$$

$$Re = 1.74(\psi Ar)^{0.5} \quad (2.21)$$

Рассмотрим физический смысл критериев  $Re$  и  $Ar$ .

Критерий Рейнольдса является мерой отношения инерционных сил в жидкостном потоке (в данном случае при обтекании частицы) и вязкостных сил. При малых значениях  $Re$  наблюдается преобладание вязкостных сил над силами инерции и при обтекании частицы не происходит образования вихрей. При больших значениях  $Re$ , наоборот, преобладает действие инерционных сил. Возмущения жидкостного потока, возникшие при обтекании частицы, вязкостные силы погасить не могут, и за частицей возникает цепочка вихрей.

Критерий Архимеда является мерой отношения подъемной силы (являющейся разностью силы тяжести и архимедовой силы) к вязкостным силам.

Таким образом, критериальные уравнения учитывают не только действующие на частицу в процессе осаждения силы (уравнение (1.2)), но и характерные особенности обтекания частицы жидкостью.

**Описание установки** Установка состоит из трех стеклянных цилиндров, заполненных разными жидкостями: водой, маслом и глицерином.

В верхней и нижней части каждого цилиндра имеются метки, фиксирующие расстояние, которое частица проходит в процессе осаждения.

Замеряя время, в течение которого частица проходит расстояние между метками, можно определить скорость осаждения частицы.

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

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучите теорию процесса осаждения частиц в жидкой среде.

2. Ознакомьтесь с устройством экспериментальной установки. Зарисуйте её принципиальную схему и сделайте краткое описание.

3. Уточните наименование жидкости, помещенной в каждом из цилиндров. Проведите замер температуры жидкости в каждом цилиндре.

4. Проведите замер расстояния между верхними и нижними метками на цилиндрах.

5. Получите у преподавателя или лаборанта твердые тела.

6. Взвесьте на аналитических весах частицы с точностью до 0,1 г. Измерьте геометрические размеры, полученных частиц с точностью до 0,1 мм.

7. Рассчитайте плотность материалов шариков по формуле

$$\rho_T = \frac{m_6}{\pi d^3};$$

где  $m$  – масса шариков, кг

$d$  – диаметр шариков, м.

8. Приступите к выполнению опыта. Шарик известного или замеренного диаметра помещают над поверхностью жидкости и отпускают. Время прохождения частицы между метками фиксируют секундомером. Каждый замер дублируют. Результаты опытов заносят в таблицу.

Если частица коснулась стенки сосуда или к частице прилип пузырек воздуха, результаты таких опытов (замеров) не учитывают и производят повторные опыты.

9. Рассчитайте скорость осаждения по формуле

$$\omega_{oc} = \frac{H}{\tau}$$

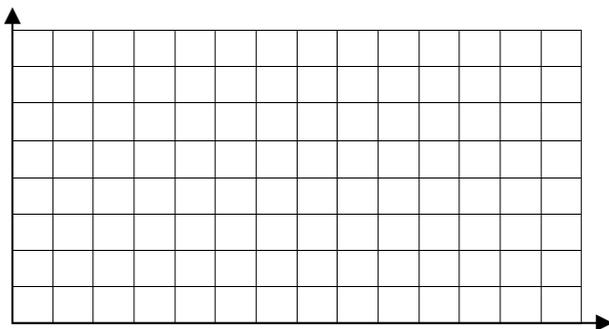
где  $H$  – расстояние между метками цилиндра, м

$\tau$  – длительность осаждения, с.

10. Рассчитайте критерий Архимеда по формуле 2.11

11. Проведите расчет критерия Рейнольдса по формуле 2.13. По найденному  $Re'$  находят расчетную скорость осаждения.

12. Постройте график зависимости  $Re = f(Ar)$



13. Определите коэффициент сопротивления  $\varphi$  по формуле 1.10

14. Определите отклонения расчетных и опытных значений скорости осаждения по формуле

$$\Delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\max}} \cdot 100\%$$

Наименование жидкости	Температура жидкости, °С	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость $\nu$ , м <sup>2</sup> /с ;	Динамическая вязкость, $\mu$ , Па·с ( $\mu = \rho \cdot \nu$ )
Вода	20	998	$1,01 \cdot 10^{-6}$	0,001
Масло	20	880	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,044
Глицерин	20	1263	$6,7 \cdot 10^{-4}$	0,846

Рис. 2.2 Схема лабораторной установки

№ п/п	Жидкость		Шарик		Расстояние между метками цилиндра, м	Длительность осаждения, с	Скорость осаждения при опыте, с	Ar	Re	Расчетное значение скорости осаждения, м/с	Относительная ошибка, %
	Наименование	Температура	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент вязкости, Па·с							
1											
2											
3											
4											
5											

Вывод: \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_

## Лабораторная работа №3

### Гидродинамика псевдооживленного слоя сыпучего материала

**Цель работы:** Экспериментально определить скорость начала псевдооживления и витания частиц при стесненных условиях в потоке воздуха и сопоставить их с рассчитанными значениями.

Проследить условия перехода зернистого слоя из неподвижного состояния во взвешенное и в режим пневмотранспорта.

**Оборудование:** пневмокласификатор типа РПК – 30 (рисунок 3.5), пульт контрольно-измерительных приборов (амперметр, вольтметр), трансформатор, весы лабораторные ВМ 512, манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01 М, шланги силиконовые, линейка миллиметровая, сито, трубки Пито.

### Основные определения и теория процесса

На одиночную твердую частицу в направленном вверх потоке газа или жидкости действуют (рис. 2.1) сила тяжести (подъемная (архимедова) сила  $A$  и сила динамического (скоростного) давления потока  $P$ .

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

$$\varepsilon = (V_{cl} - V_m)/V_{cl} = 1 - V_m/V_{cl}, \quad (3.1)$$

где  $V_{cl}$  - общий объем, занимаемый слоем, м<sup>3</sup>;

$V_m$  - объем, занимаемый только твердыми частицами, м<sup>3</sup>.



Рис. 3.1. Силы, действующие на твердую частицу в направленном вверх потоке

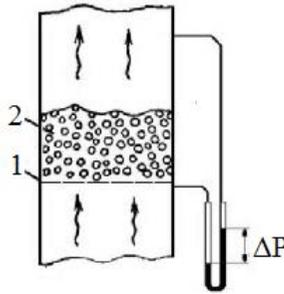


Рис. 3.2. Измерение гидравлического сопротивления слоя: 1 – решетка; 2 – слой твердых частиц.

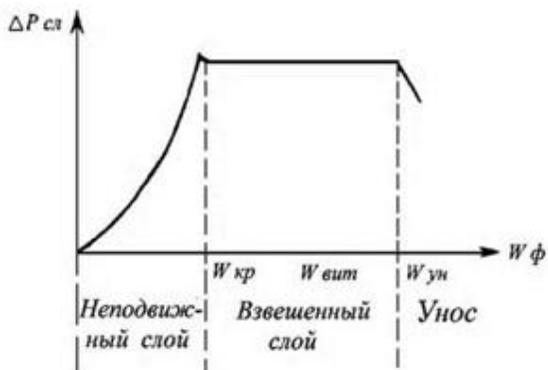


Рис. 3.3 Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа

### Порядок выполнения работы

1. Провести тарировку пневмокласификатора и построить график зависимости скорости воздушного потока ( $W$ , м/с) в пневмопроводе 3 от напряжения ( $V$ , В) на обмотке электродвигателя привода вентилятора.

Таблица 3.1 – Зависимость скорости воздушного потока от напряжения.

V, В	60	80	100	120	140	160	180	200	220
W, м/с									

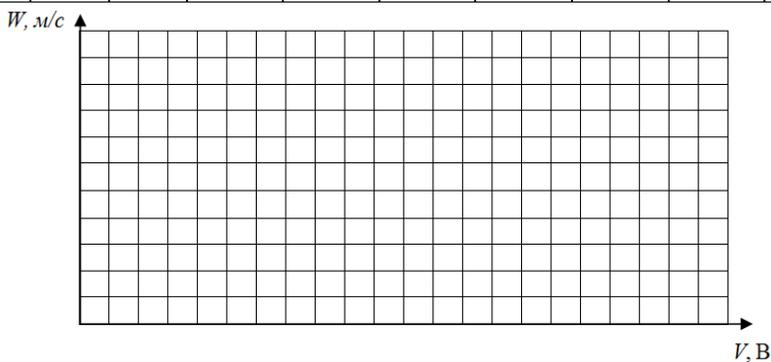


Рис. 3.4 Тарировочный график

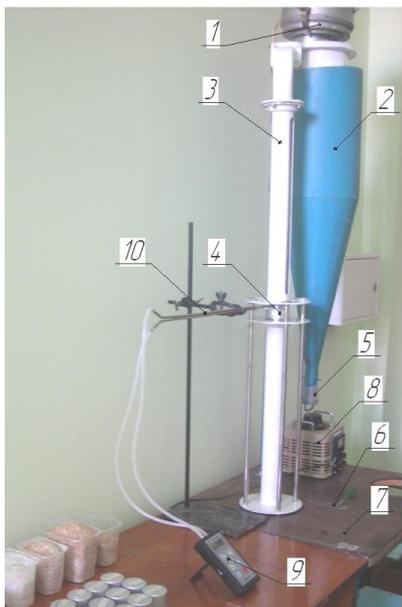


Рис. 3.5 – Лабораторная установка  
 1-вентилятор; 2-циклон; 3-пневмопровод; 4-стакан поджимной; 5-стакан сборный; 6-рычажный механизм; 7-стол; 8-трансформатор; 9-дифференциальный манометр; 10-трубка Пито

2. Исходная навеска исследуемого материала засыпается в стакан 4, который встраивается в пневмопровод 3.

3. Постепенно увеличиваем скорость воздушного потока, поворачивая ручку трансформатора, регистрируем скорость воздушного потока и перепад давления в таблице 2.2.

4. Наблюдаем за состоянием зернистого материала через смотровое окно.

5. При переходе неподвижного слоя в псевдооживленный, фиксируем значение скорости воздушного потока начала псевдооживления.

6. Далее фиксируем значения при переходе материала во взвешенное состояние, и уносе частиц.

7. Расход воздуха  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  определяем по следующему выражению:

$$Q = W \cdot \omega, \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (3.2)$$

где  $\omega$  - площадь сечения пневмопровода,  $\text{м}^2$ .

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,055^2}{4} = 0,00237 \left[ \text{м}^2 \right]$$

Таблица 3.2 – Данные проведенных опытов

№ п/п	Расход воздуха $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Напряжение $V$ , В	Скорость воздуха в пневмопроводе, $W$ , м/с	Наблюдаемый режим	Перепад давления, $\Delta P$ , мм. вод. ст.
1					
2					
3					
4					
5					
6					

7					
8					

8. По данным таблицы 3.2 строим график зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа.

$\Delta P$ , мм вод.ст.

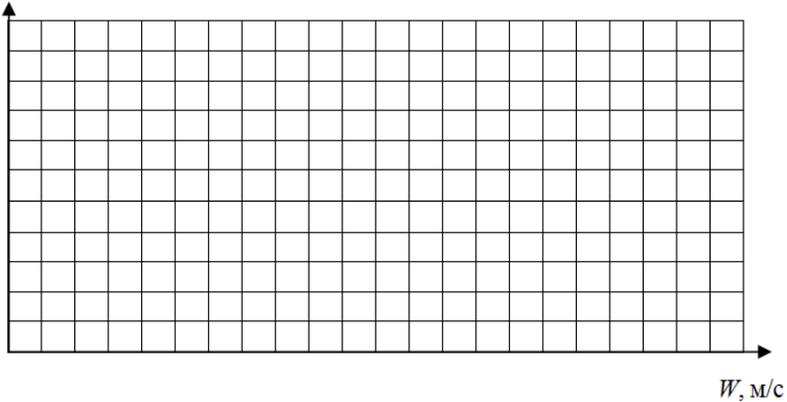


Рис. 3.6 Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа

9. По построенному графику определить  $W_{кр}$  и рассчитать  $Lu$ , по формуле:

$$Lu = \frac{W^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho_m g}, \quad (3.3)$$

где  $\rho_c$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_m$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_c$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

10. По графической зависимости  $Lu$  от  $Ar$  и  $\varepsilon$  (см. рис. 2.7) определить  $Ar$  при  $\varepsilon = 0,4$  и рассчитать диаметр частиц из формулы:

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c \rho_m g}{\mu_c^2}, \quad (3.4)$$

принимая плотность частиц  $\rho_m$

$$\rho_m = \frac{3m_m}{4\pi(d/2)^3},$$

где  $m_m$  – средняя масса частицы, кг.

Необходимые для расчетов значения плотности и вязкости воздуха приведены в таблице 3.4.

11. Рассчитать скорость уноса частиц данного диаметра по значению  $Lu$  при  $\varepsilon = 1$ . Определить вес частиц в слое:

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m g. \quad (3.5)$$

Таблица 3.3 – Результаты расчетов и эксперимента

№ п/п	Определяемые параметры	Значения
1	Диаметр частиц, $d$ , мм	
2	Критическая скорость псевдоожижения, $W_{кр}$ , м/с	
3	Скорость витания экспериментальная, $W_{вит.}$ м/с	
4	Скорость витания расчетная, $W_{вит.}$ м/с	
5	Вес частиц в слое, $G$ , Н	

Таблица 3.4 Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

$t$ , $^{\circ}\text{C}$	$\rho$ , $\text{кг/м}^3$	$c$ , $\text{кДж/кг}\cdot\text{K}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\text{Вт/м}\cdot\text{K}$	$\mu \cdot 10^6$ , $\text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6$ , $\text{м}^2/\text{с}$	$Pr$
0	1,293	1,005	2,44	17,17	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,66	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,15	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,64	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,13	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,62	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,89	20,11	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,60	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,48	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,88	23,13	0,688
130	0,898	1,009	3,34	22,86	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,74	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,52	30,00	0,682

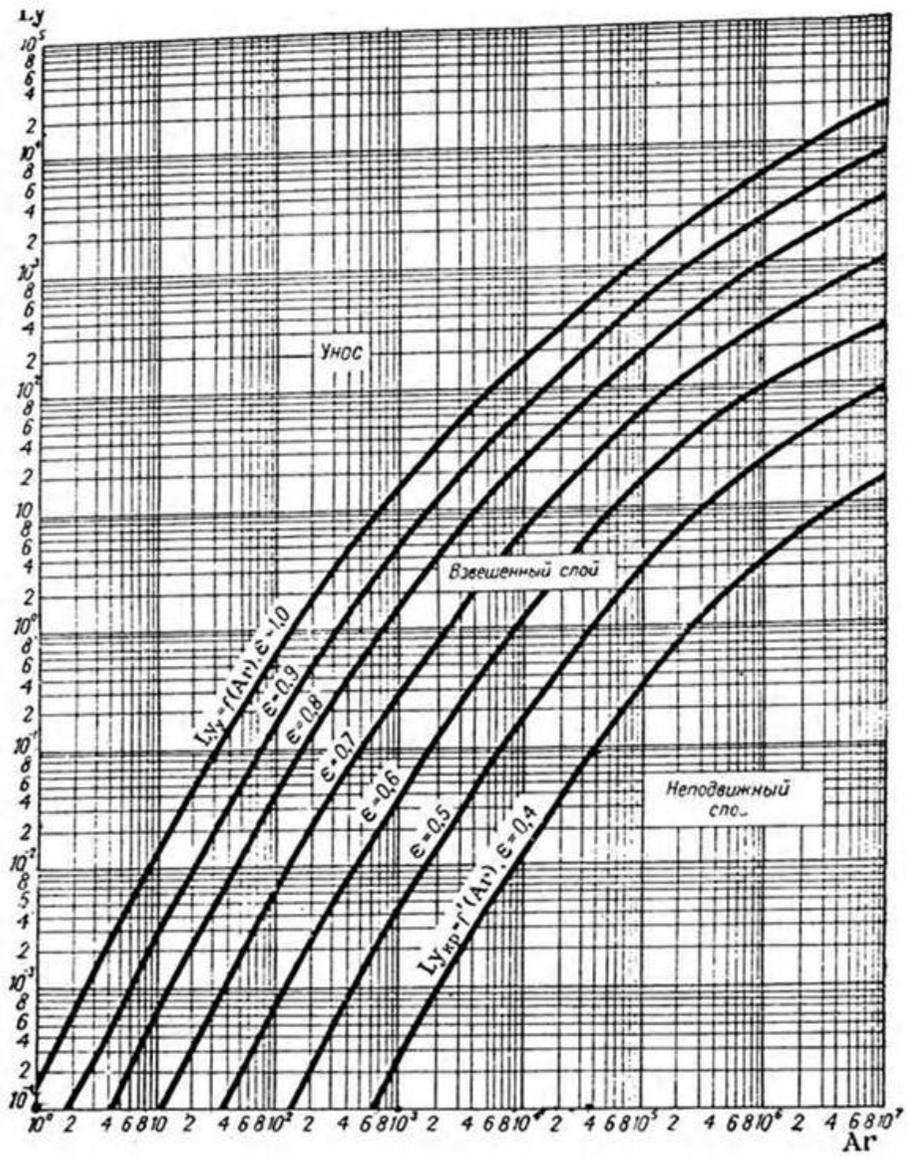


Рис. 3.7 Зависимость критерия  $L_u$  от критерия  $Ar$  и порозности слоя  $\epsilon$ .

Вывод: \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_

## Лабораторная работа №4

### Испытание теплопередачи водяного теплообменника

**Цель работы.** Определение коэффициента теплопередачи водяного теплообменника, работающего по схеме прямотока и противотока.

**Лабораторная установка.** Объектом испытания служит установка, выполненная в виде простейшего водяного теплообменника, состоящего из четырех одинаковых секций, которые выполнены в виде труб, помещенных одна в другую (рис 3.1).

Циркуляционный контур горячей воды 4 включает в себя электрический водонагреватель 1, центробежный насос 3, трубу теплообменника 2.

Холодная водопроводная вода нагревается в пространстве между трубами теплообменника, стекает в сливной трубопровод и отводится в канализацию.

Для контроля за расходом теплоносителя в течение опыта, в линии горячей 4 и холодной воды 7 врезаны ротаметры 5,6, снабженные водомерными стеклами с тарировочной шкалой.

Температуру первичного и вторичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника измеряют при помощи датчиков электронных термометров.

### Порядок выполнения работы

При испытании установки на прямотоке выполняют следующие операции:

Открывают последовательно вентили 7,8,9 для пуска холодной воды в установку. Расход холодной воды меняют вентилем 7. Для первой точки установить 70, для второй – 90, третьей – 120, четвертой – 150 кг/ч (табл. 9).

Расход на отводящей трубе линии горячей воды при помощи вентиля 8 устанавливают постоянным, равным 70 кг/ч (10 делений по ротаметру). Прогревают установку до наступления установившегося режима, характеризующегося постоянством во времени температур первичного и вторичного теплоносителя на входе. При этом температура горячей воды на входе в подогреватель должна быть в пределах 60...70 °С. При испытании установки снимаются следующие измеряемые параметры:

- температура холодной воды на входе  $t'_1$  °С;
- температура холодной воды на выходе  $t''_1$  °С;
- средняя температура холодной воды  $t_1 = 0,5(t'_1 + t''_1)$ ;
- температура горячей воды на входе  $t'_2$  °С;
- температура горячей воды на выходе  $t''_2$  °С;
- средняя температура горячей воды  $t_2 = 0,5(t'_2 + t''_2)$ ;
- температура стенки внутренней трубы  $t_c = 0,5(t_1 + t_2)$ ;

- расход холодной воды  $G_1$  кг/ч;
- расход горячей воды  $G_2$  кг/ч.

Таблица 4.1 – Тарировочная таблица

Показания ротаметра	Расход, кг/ч
10	70
20	90
30	120
40	150
50	170
60	240

Как только будет достигнут установившийся режим работы установки на противотоке, с интервалом 5 мин, проводят 4 опыта.

По окончании испытания на противотоке отключают электронагреватель 1. Закрывают вентили 7, 8 и 9. Значения показателей всех величин, измеренных в течение опыта, заносят в таблицу 3.2.

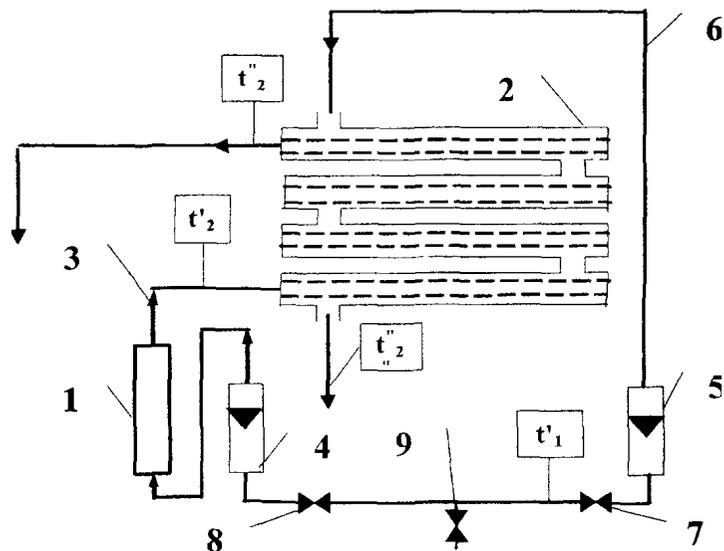


Рис. 4.1. Схема установки для испытания теплопередачи водяного теплообменника: 1 - электрический водонагреватель; 2 - теплообменник; 3 - линия горячей воды; 4,5 - ротаметры; 6 - линия холодной воды; 7,8,9 - вентили

Таблица 4.2 – Исходные данные

Номер опыта	$t'_1$ °С	$t''_1$ °С	$t_1$ °С	$t'_2$ °С	$t''_2$ °С	$t_2$ °С	$t_c$ °С	$G_1$ , кг/ч	$G_2$ , кг/ч
1									
2									
3									
4									

Физические параметры холодной и горячей воды выбирают из таблицы 3.4 в зависимости от среднеарифметических температур.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

#### 1. Определение скорости движения холодной и горячей воды

$$V = \frac{G}{3600 \rho S}, \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup> (см. табл.3.4);

$S$  – сечение для прохода воды:

$$\text{холодной } S_1 = \frac{\pi(D_e^2 - d_n^2)}{4}, \text{ горячей } S_2 = \frac{\pi d_e^2}{4}; \text{ м}^2 \quad (4.2)$$

где внутренний диаметр внутренней трубы  $d_n = 0,013$  м, наружный диаметр внутренней трубы  $d_n = 0,015$  м, внутренний диаметр внешней трубы  $D_n = 0,022$  м.

#### 2. Определение критериев Рейнольдса для холодной и горячей воды

$$R_{e1} = \frac{V_1(D_e - d_n)}{\nu_1}; R_{e2} = \frac{V_2 d_e}{\nu_2}, \quad (4.3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  - кинематическая вязкость холодной и горячей воды, м<sup>2</sup>/с (см. табл.3.4).

#### 3. Определение критериев Нуссельта холодной и горячей воды:

а) для ламинарного режима течения жидкости (при  $R_e < 2300$ )

$$N_u = 0,15 R_e^{0,33} P_r^{0,43} \left( \frac{P_r}{P_{rc}} \right)^{0,25}, \quad (4.4)$$

б) для турбулентного режима ( $R_e > 2300$ )

$$N_u = 0,021 R_e^{0,8} P_r^{0,43} \left( \frac{P_r}{P_{rc}} \right)^{0,25}, \quad (4.5)$$

где  $P_r$  – критерий Прандтля холодной и горячей воды (см. табл.3.4);

$P_{re}$  – критерий Прандтля стенки внутренней трубы (берется из табл.3.4 по температуре стенки).

4. *Определение коэффициентов теплоотдачи*

$$\alpha_1 = \frac{N_{u1}\lambda_1}{D_e - d_n}; \alpha_2 = \frac{N_{u2}\lambda_2}{d_e}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}, \quad (4.6)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности холодной и горячей воды, Вт/м·К (см. табл.3.4).

5. *Определение коэффициентов теплопередачи по формулам:*

а) через коэффициенты теплоотдачи при  $\frac{d_n}{d_e} \leq 1,4$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \text{Вт / м}^2 \cdot \text{К} \quad (4.7)$$

где  $\delta = 0,5(d_n - d_b)$  – толщина стенки внутренней трубы, м;

$\lambda = 386$  Вт/м·К – коэффициент теплопроводности материала стенки;

б) через количество теплоты, переданной от греющей среды к нагреваемой:

$$K = \frac{Q}{3600F(t_2 - t_1)}, \quad \text{Вт / м}^2 \cdot \text{К}, \quad (4.8)$$

где  $Q$  – количество переданной теплоты, кДж/ч;

$F$  – поверхность нагрева внутренней трубы, м<sup>2</sup>.

6. *Количество переданного тепла и поверхность нагрева трубы определяют по формулам:*

$$Q = G_1 c_1 (t_1'' - t_1'); \text{ кДж / ч}, \quad (4.9)$$

$$F = \pi \cdot d_n \cdot l \cdot n, \text{ м}^2, \quad (4.10)$$

где  $c_1$  – теплоемкость холодной воды, кДж/кг·К (см. табл.5);

$L = 1$  м – длина трубы одной секции теплообменника;

$n = 4$  – количество секций.

7. *Значения величин, вычисленных по формулам (1-10), занести в таблицу 3.3, представленную в отчете.*

Таблица 4.3 – Расчетные величины

Номер опыта	$V_1$ м/с	$V_2$ м/с	$R_{e1}$	$R_{e2}$	$N_{u1}$	$N_{u2}$	$\alpha_1$ Вт/м <sup>2</sup> К	$\alpha_2$ Вт/м <sup>2</sup> К	$K$ (7) Вт/м <sup>2</sup> К	$K$ (8) Вт/м <sup>2</sup> К
1										
2										
3										
4										

1. Построить графики зависимости коэффициента теплоотдачи (от внутренней трубы к холодной воде) и коэффициента теплопередачи между теплоносителями от скорости течения холодной воды, т.е.  $\alpha = f(V_1)$  и  $K = f(V_1)$ .

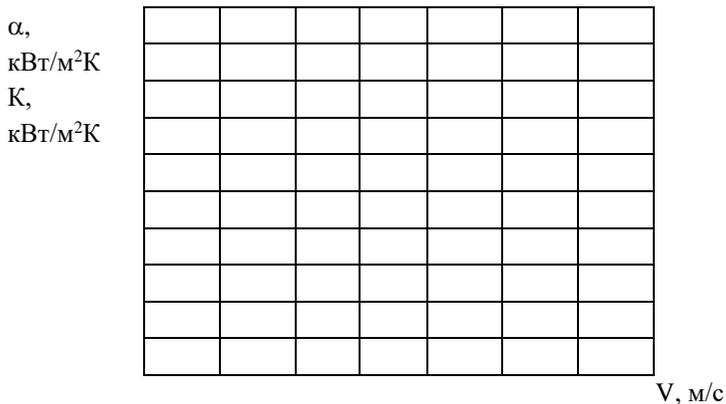


Рис. 4.2 Графики зависимостей  $\alpha = f(V)$  и  $K = f(V)$

Вывод: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_

Таблица 4.4 – Физические параметры воды

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	c, кДж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$P_r$
10	999,7	4,19	0,575	1,306	9,52
15	999,0	4,19	0,586	1,156	8,27
20	998,2	4,18	0,599	1,106	7,02
25	997,0	4,18	0,608	0,945	6,22
30	995,7	4,17	0,619	0,805	5,42
35	993,9	4,17	0,626	0,732	4,86
40	992,2	4,17	0,634	0,659	4,31
45	990,0	4,17	0,641	0,607	3,92
50	988,1	4,17	0,648	0,556	3,54
55	985,7	4,18	0,654	0,517	3,26
60	983,2	4,18	0,659	0,478	2,98
70	987,8	4,19	0,668	0,415	2,55

### Лабораторная работа № 5

#### Исследование сушки влажного материала в СВЧ сушильной установке

**Цель работы:** изучить процесс сушки на примере СВЧ сушилки, определить влажность и температуру высушиваемого материала, построить графики сушки, скорости сушки.

**Оборудование:** микроволновая печь Sanyo, лабораторные весы BM-512, пирометр Opttris.

#### Порядок выполнения работы

1. Подготовить влажный материал для сушки.
2. Определить вес влажного материала.
3. Замерить температуру влажного материала, температуру внутри камеры и снаружи.
4. Установить изучаемый материал в камеру.
5. Периодично через каждые 30 секунд замерять вес высушиваемого материала, температуру влажного материала, температуру внутри камеры и снаружи.
6. Опыт заканчивается после того, как прекратиться убыль массы материала.
7. Результаты опыта заносить в отчетную таблицу.
8. Построить графики по данным таблицы.

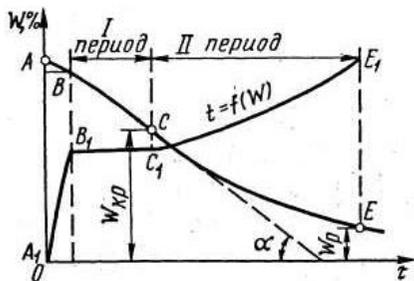
Таблица 5.1- Данные расчетов и результатов опыта

№ п/п	Время опыта $\tau$ , с.	Масса материала		$G_B$ , г	W, %	$t_{\text{продукта}}$ , °C	$t_{\text{внутри камеры}}$ , °C	$t_{\text{снаружи камеры}}$ , °C
		$G_{H1}$ , г	$G_{K1}$ , г					
Исх.	0							
1	30							
2	60							
3	90							
4	120							
5	150							
6	180							
7	210							
8	240							

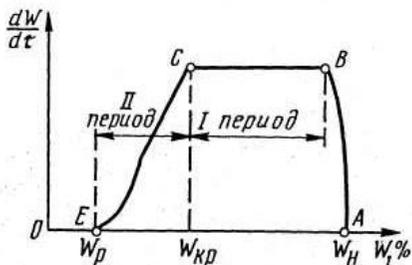
**Методика расчета**

- $G_B = G_H - G_K$
- $W_{\text{исх}} = ((G_{H1} - G_{K1}) / G_{H1}) \cdot 100\%$   
где  $G_{H1} - G_{K1} = G_B$  полн.

- $W_1 = ((G_B \text{ полн.} - G_{B1}) / G_{H1}) \cdot 100\%$   
где  $G_B \text{ полн.} - G_{B1} = G_{W1}$
- $W_2 = ((G_{W1} - G_{B2}) / G_{H1}) \cdot 100\%$   
где  $G_{W1} - G_{B2} = G_{W2}$

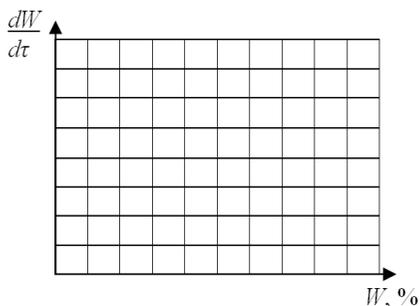
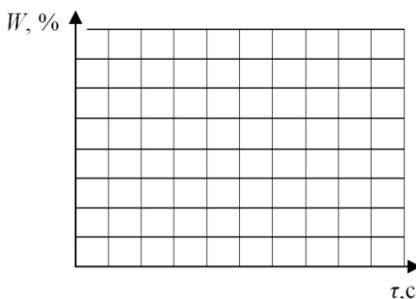


Кривая сушки



Кривые скорости сушки

Рис. 5.1 - Теоретические зависимости процесса сушки



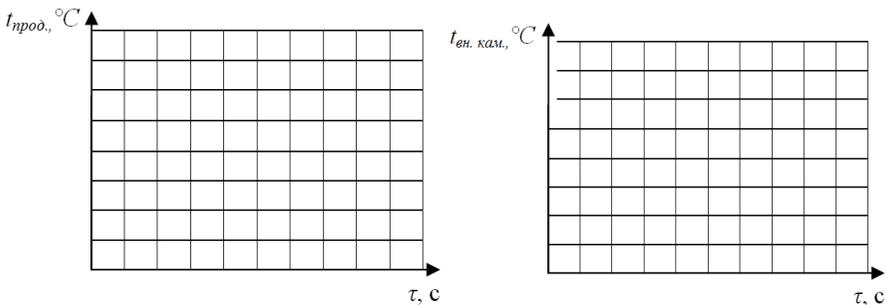


Рис. 5.2 - Экспериментальные зависимости процесса сушки

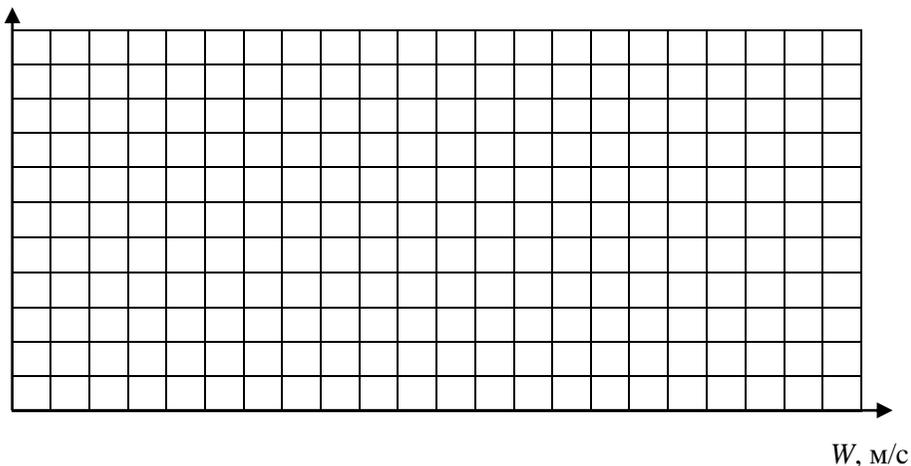
Вывод: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_

$\Delta P$ , мм вод .ст.



## Лабораторная работа №6

### Экспериментально-теоретическое исследование планетарного смесителя

#### Содержание работы

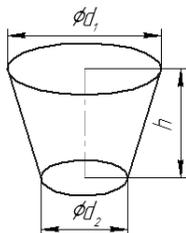
1. Определить мощность привода рабочего органа.
2. Определить производительность машины.
3. Составить кинематическую схему машины.

**Оборудование:** смеситель KENWOOD, контрольно-измерительный прибор (амперметр, вольтметр) MASTER KIT, весы лабораторные ВМ 512, линейка миллиметровая, набор штампованных лабораторных решет, секундомер, пробоотборник.

**Материалы:** пшено 1 кг и гречневая крупа 1 кг

#### Порядок выполнения работы

1. Определить геометрические размеры чаши смесителя и определить её объём.



d <sub>1</sub> , м	d <sub>2</sub> , м	h, м	V, м <sup>3</sup>

$$V = \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2) \quad (6.1)$$

2. По очереди, не смешивая, засыпать по 200 г крупы в чашу смесителя.
3. Установить лопасть смесителя.
4. Включить смеситель на 2-ой скорости на 10 сек.
5. Определить показания вольтметра  $U$ ,  $B$  и амперметра  $I$ ,  $A$  и занести в таблицу 1.
6. Взять пробы пробоотборником в 4-х точках.
7. Определить массу всей пробы,  $M_{пр}$ , г
8. На лабораторных решетках разделить смесь на компоненты.
9. Определить массу каждого компонента смеси  $M_1$  и  $M_2$ , г и занести в таблицу 1.

**Таблица 6.1. Протокол испытаний № 1**

№	Время опыта $\tau$ , с	$U$ , В	$I$ , А	Масса пробы $M_{пр}$ , г	Масса первого компонента $M_1$ , г	Масса второго компонента $M_2$ , г
1	10					
2	20					
3	30					









Составитель Мезенов Артём Анатольевич

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Рабочий журнал предназначен для студентов очной и заочной формы обучения по направлению: Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции

