

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра Механизации животноводства и переработки
сельскохозяйственной продукции

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Рабочий журнал
для выполнения лабораторных работ

Ф.И.О. _____

группа _____

Новосибирск 2021

Кафедра механизации животноводства и переработки
сельскохозяйственной продукции

Рецензент: к.т.н., доц. ***Е.А. Булаев***

Составители: к.т.н., доц. ***Е.А. Пшенов***,
к.т.н., доц. ***А.А. Мезенов***

Процессы и аппараты пищевых производств: журнал для выполнения лабораторных работ / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост.: Е.А. Пшенов, А.А. Мезенов. – Новосибирск, 2021. – 34 с.

Рабочий журнал предназначен для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям подготовки: Агроинженерия; Продукты питания животного происхождения; Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции; Технология продукции и организация общественного питания.

Утвержден и рекомендован к изданию методическим советом Инженерного института НГАУ.

© Новосибирский государственный
аграрный университет, 2021
© Инженерный институт, 2021

Лабораторная работа №1

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 ρ_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

$$G - A - R = J, \quad (1.1)$$

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

G – сила тяжести, действующая на частицу;

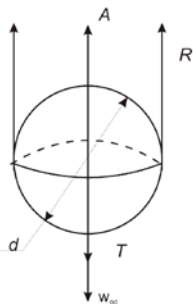


Рис. 1.1 Силы, действующие на частицу, осаждающуюся в гравитационном поле

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

A – выталкивающая сила, равная по закону Архимеда весу объема вытесненной частицей жидкости;

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

R – сила сопротивления, отнесенная к поперечному сечению частицы

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

J – сила инерции.

Здесь: m – масса частицы; φ – коэффициент сопротивления; w_{oc} – скорость осаждения частицы; τ – 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 φ , 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

$$\varphi = \frac{24}{Re} \quad (1.6)$$

Эта зависимость хорошо аппроксимирует опытные данные при

$Re \leq 1,85$. 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 $1,85 < Re < 500$.

С увеличением числа Re в кормовой части осаждающейся частицы образуется зона, в которой существует замкнутое циркуляционное (вихревое) движение. Пока значения числа Re невелики, вихри устойчивы. При дальнейшем увеличении числа 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

$$\varphi = \frac{18.5}{\text{Re}^{0.6}} \quad (1.7)$$

При увеличении числа Re выше 500 коэффициент сопротивления остается практически постоянным, не зависящим от числа 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

$$\varphi = 0,44 \quad (1.8)$$

Используя уравнение (2.4) и уравнения (1.6)–(1.8), 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 (1.4) определим φ как функцию остальных параметров

$$\varphi = \frac{4 (\rho_T - \rho_{жс}) g d}{3 \rho_{жс} \omega_{oc}^2} \quad (1.9)$$

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

$$\varphi \text{Re}^2 = \frac{4 (\rho_T - \rho_{жс}) g d^3 \rho_{жс}}{3 \mu_{жс}^2} \quad (1.10)$$

Безразмерный комплекс в правой части является критерием Архимеда

$$\text{Ar} = \frac{(\rho_T - \rho_{жс}) g d^3 \rho_{жс}}{\mu_{жс}^2} \quad (1.11)$$

Из уравнения (1.10) получаем

$$Re = 1,15 \left(\frac{Ar}{\varphi} \right)^{0.5} \quad (1.12)$$

Подставляя в уравнение (1.12) значение φ из уравнений (1.6)–(1.8), 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:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (1.13)$$

Для различных режимов существуют также следующие критериальные зависимости:

В ламинарном режиме

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (1.14)$$

В переходном режиме

$$Re = 0.152Ar^{0.715} \quad (1.15)$$

В турбулентном режиме

$$Re = 1.74Ar^{0.5} \quad (1.16)$$

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 , ρ_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

$$\omega_{oc} = \frac{Re}{d} \frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж}} \quad (1.17)$$

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

$$\omega_{oc} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_T - \rho_{ж})gd^2}{\mu_{ж}} \quad (1.18)$$

Эта формула носит название формулы Стокса.

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

Коэффициент формы ψ 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 $f_{ш} = f_{ч}$), а для частиц любой иной формы $\psi < 1$.

С учетом коэффициента ψ уравнения (1.14) – (1.16) имеют Вид

$$Re = \frac{\psi Ar}{18} \quad (1.19)$$

$$Re = 0.152(\psi Ar)^{0.715} \quad (1.20)$$

$$Re = 1.74(\psi Ar)^{0.5} \quad (1.21)$$

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

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

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

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

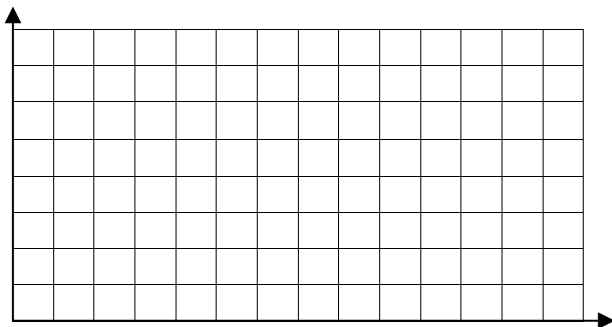
где H – расстояние между метками цилиндра, м

τ – длительность осаждения, с.

10. Рассчитайте критерий Архимеда по формуле 1.11

11. Проведите расчет критерия Рейнольдса по формуле 1.13 По найденному Re' находят расчетную скорость осаждения.

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



13. Определите коэффициент сопротивления φ 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 ρ , кг/м ³	Кинематическая вязкость ν , м ² /с ;	Динамическая вязкость, μ , 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. 1.2 Схема лабораторной установки

№ п/п	Жидкость		Шарик		Рас- стояние между метками цилин- дра, м	Дли- тель- ность осаж- дения, с	Скорость осаждения при опы- те, с	Ar	Re	Расчетное значение скорости осаждения, м/с	ξ	Относи- тельная ошибка, %
	На- име- но- вание	Тем- пера- тура кг/м ³	Плот- ность, кг/м ³	Ко- эф- фи- ци- ент вяз- кос- ти, Па·с	Диа- метр, м	Масса, кг	Плот- ность мате- риала, кг/м ³					
1												
2												
3												
4												
5												

Вывод: _____

Дата _____

Подпись преподавателя: _____

Лабораторная работа №2

Гидродинамика псевдоожиженного слоя сыпучего материала

Цель работы: Экспериментально определить скорость начала псевдоожижения 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 2.5), 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 ε - объемная доля газа в слое:

$$\varepsilon = (V_{cl} - V_m)/V_{cl} = 1 - V_m/V_{cl}, \quad (2.1)$$

где V_{cl} - общий объем, занимаемый слоем, м^3 ;

V_m - объем, занимаемый только твердыми частицами, м^3 .



Рис. 2.1. Силы, действующие на твердую частицу в направленном вверх потоке

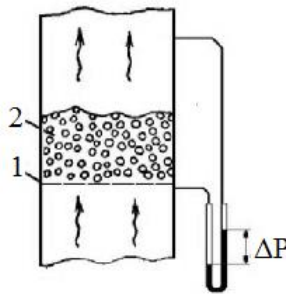


Рис. 2.2. Измерение гидравлического сопротивления слоя: 1 – решетка; 2 – слой твердых частиц.

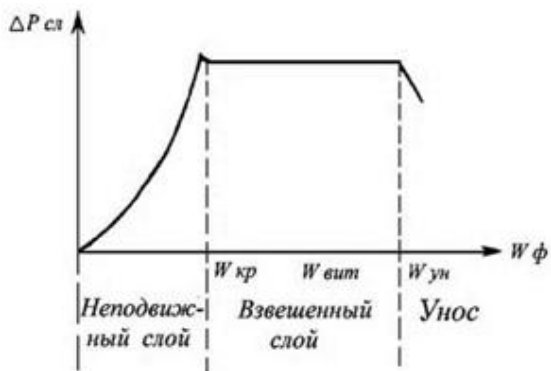


Рис. 2.3 Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа

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 2.1 – Зависимость скорости воздушного потока от напряжения.

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

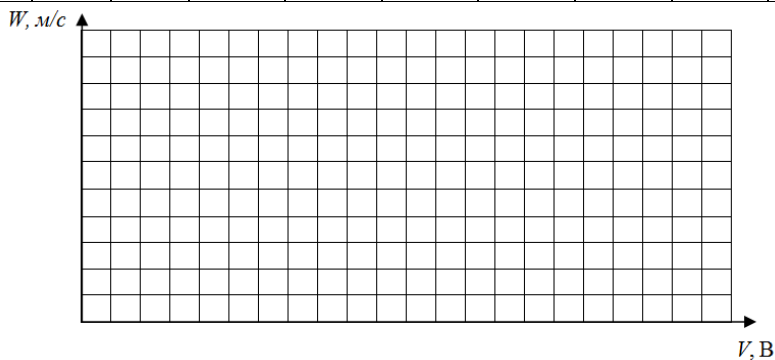


Рис. 2.4 Тарировочный график

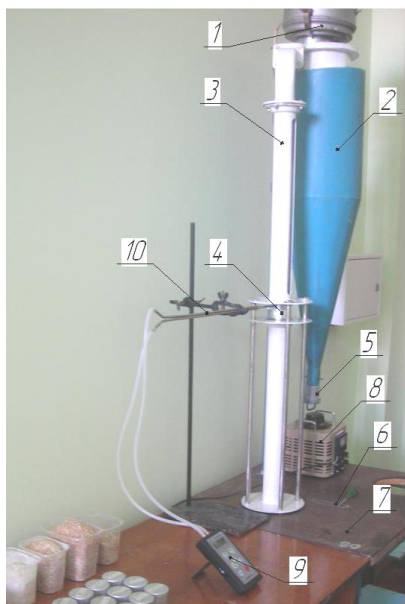


Рис. 2.5 – Лабораторная установка
1-вентилятор; 2-циклон; 3-
пневмопровод; 4-стакан поджимной;
5-стакан сборный; 6-рычажный меха-
низм; 7-стол; 8-трансформатор; 9-
дифферен-циальный манометр; 10-
трубка Пито

вода, м².

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

Таблица 2.2 – Данные проведенных опытов

№ п/п	Расход воздуха Q, м ³ /с	Напряжение V, В	Скорость воз- духа в пневмо- проводе, W, м/с	Наблюдае- мый ре- жим	Перепад давления, ΔP, мм. вод. ст.
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

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 псевдоожиженный, фиксируем значение скорости воздушного потока начала псевдоожижения.

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

7. Расход воздуха Q, м³/с определяем по следующему выражению:

$$Q = W \cdot \omega, \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right] \quad (2.2)$$

где ω - площадь сечения пневмопро-

8					
---	--	--	--	--	--

8. По данным таблицы 2.2 строим график зависимости гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа.

ΔP , мм вод.ст.

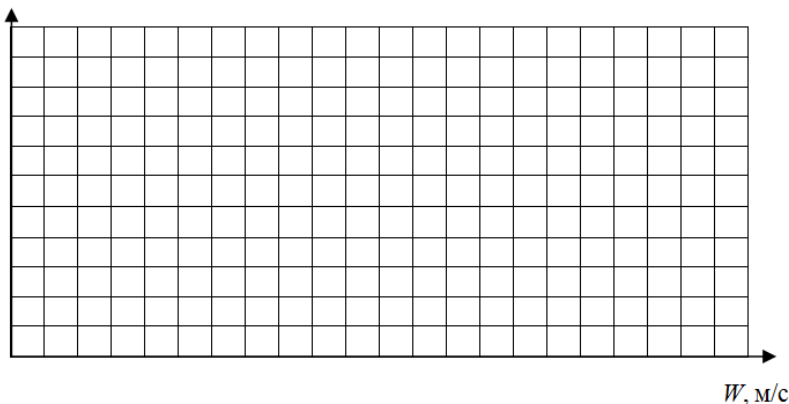


Рис. 2.6 Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа

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

$$Lu = \frac{W^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho_m g}, \quad (2.3)$$

где ρ_c – плотность газа, кг/м³;

ρ_m – плотность частиц, кг/м³;

μ_c – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

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

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c \rho_m g}{\mu_c^2}, \quad (2.4)$$

принимая плотность частиц ρ_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 2.4.

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

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m g. \quad (2.5)$$

Таблица 2.3 – 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 2.4 Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

t , $^{\circ}\text{C}$	ρ , 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

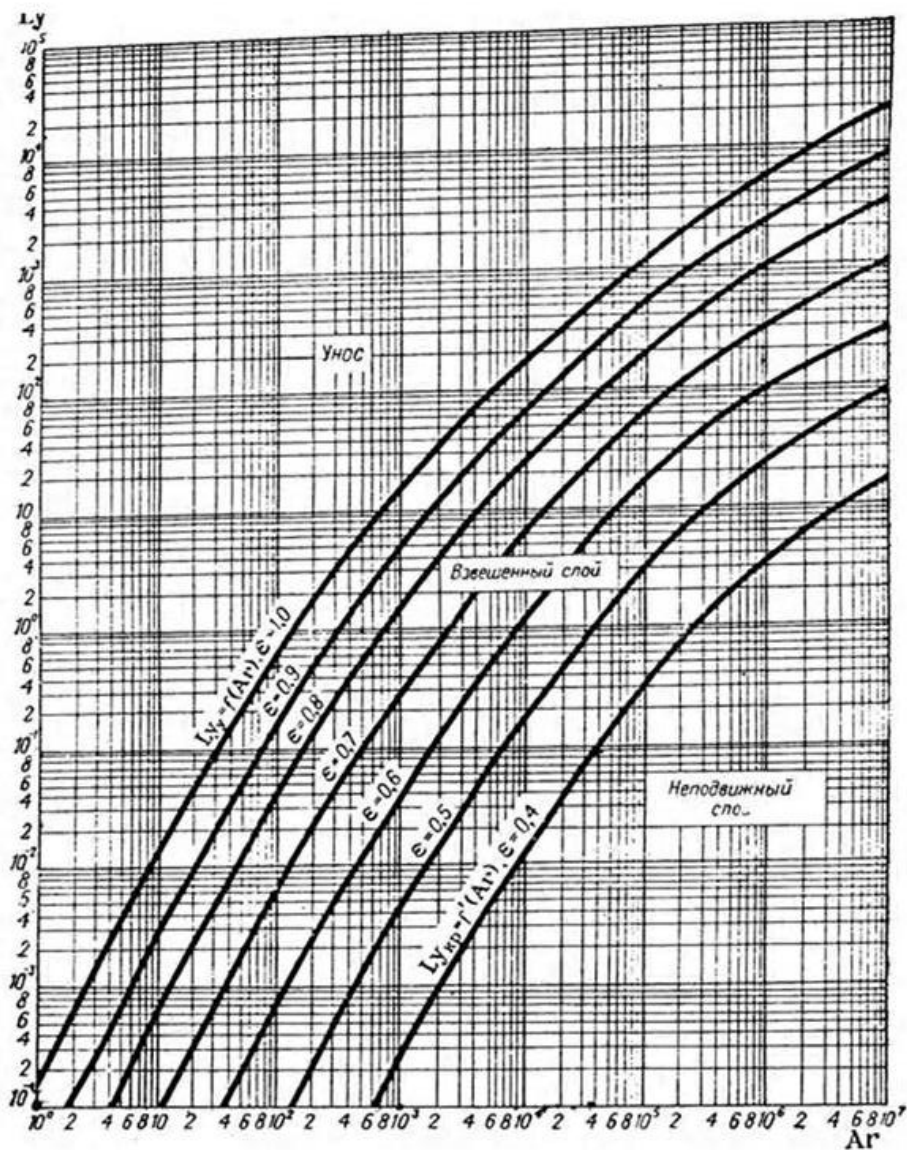


Рис. 2.7 Зависимость критерия Ly от критерия Ar и порозности слоя ϵ .

Вывод: _____

Дата _____

Подпись преподавателя: _____

Лабораторная работа 3

Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи при нагревании жидкости в аппарате с рубашкой

Цель работы: определение и расчет тепловых потоков; составление теплового баланса; определение коэффициента теплопередачи опытным и расчетным путем.

Описание лабораторной установки

Объектом испытаний служит емкостный теплообменный аппарат с тепловой рубашкой. В аппарате установлена мешалка с приводом от червячного мотор редуктора.

Блок управления аппаратом позволяет контролировать и устанавливать заданную температуру продукта, температуру теплоносителя в рубашке, изменять число оборотов мешалки.

В рубашке установлен циркуляционный насос. Блок управления насосом позволяет контролировать и регулировать мощность насоса. А также контролировать температуру теплоносителя на входе и выходе из рубашки.

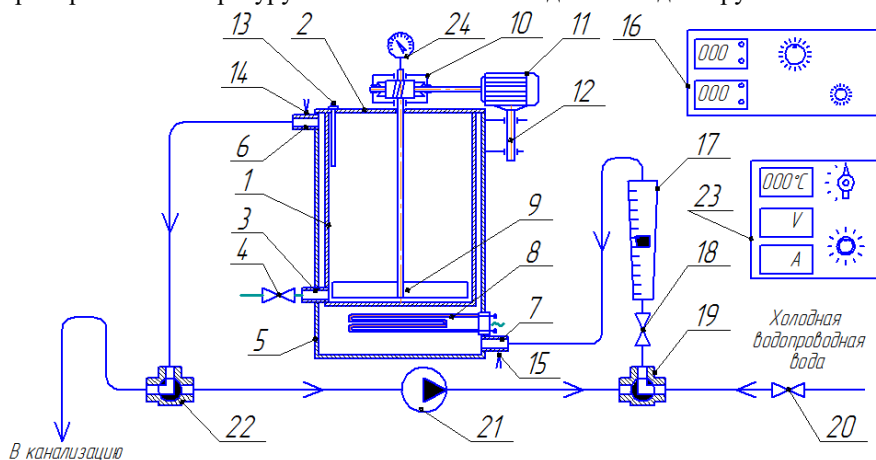


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки:

1 – цилиндрический аппарат; 2 – крышка; 3 – патрубок аппарата выпускной; 4 – кран сливной; 5 – рубашка; 6, 7 – штуцера рубашки; 8 – электронагреватель; 9 – мешалка; 10 – редуктор; 11 – электродвигатель; 12 – подвижная опора привода мешалки; 13 – термодатчик замера температуры продукта; 14, 15 – термопары замера температуры теплоносителя в рубашке на выходе и входе соответственно; 16 – блок управления тепловым аппаратом; 17 – ротаметр; 18 – регулирующий вентиль; 19, 22 – трехходовые краны; 20 – кран подачи воды из водопроводной сети; 21 – насос центробежный; 23 – блок управления насосом; 24 – тахометр.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить поверхность теплопередачи исходя из конструктивных размеров аппарата (рис.2):

$$F = \pi D_a h + 0,25\pi D_a^2 = \quad , \text{ м}^2 \quad (1)$$

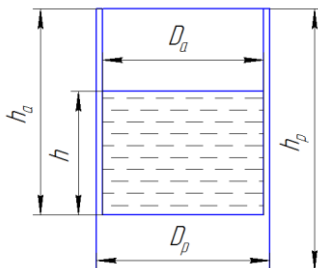


Рисунок 2 – К определению поверхности теплопередачи.

2. Рубашку теплообменного аппарата заполнить водой. Перевести трехходовой кран 19 на подачу из водопровода, открыв кран 20. Вентилем 18 регулировать подачу воды в рубашку. При этом трехходовой кран 22 переведен в положение слив в канализацию. После заполнения закрыть вентиль 18.
3. При использовании циркуляции теплоносителя, перевести краны 19 и 20 в соответствующее положение. Вентиль 18 открыть. Включить насос. Установить заданный расход теплоносителя G_1 по ротаметру 17, регулятором напряжения на блоке управления насосом 23.
4. Определить число оборотов мешалки 9 по тахометру 24.
5. В емкость аппарата залить отмеренное количество жидкости и записать значение $M_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ кг. Замерить уровень $h = \underline{\hspace{2cm}}$ м.
6. Включить электрический нагреватель 8.
7. Через каждые 3-5 мин. записываются показания цифрового индикатора температур, пока не будет достигнута требуемая температура продукта в аппарате.
8. Данные эксперимента свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	G_1 , кг/с	п, об/мин	$\Delta\tau$, ми н	Температура, °С									
				продукта			теплоносителя						
				$t_{2н}$	$t_{2к}$	t_{cp2}	$t'_{1н}$	$t''_{1н}$	$t_{1н}$	$t'_{1к}$	$t''_{1к}$	$t_{1к}$	t_{cp1}
1													
2													
...													
n													

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теплота Q , отданная ТЭНом или общий тепловой поток, расходуется на нагревание теплоносителя в рубашке Q_1 за время $\Delta\tau$, на нагревание продукта в аппарате Q_2 и на потери теплоты в окружающую среду Q_n :

$$Q = IU = Q_1 + Q_2 + Q_n = \quad \text{Вт} \quad (2)$$

1. Определить тепловой поток Q_2 , (Вт) воспринимаемый продуктом в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_2 = M_2 c_2 (t_{2к} - t_{2н}) / \Delta\tau_i, \text{ Вт} \quad (3)$$

где M_2 – масса продукта в аппарате, кг;

$t_{2н}$ – начальная температура продукта, °С;

$t_{2к}$ – заданная конечная температура продукта, °С;

c – средняя удельная теплоёмкость жидкостей при t_{cp} , Дж / кг·К;

$$t_{cp} = 0,5 (t_n + t_k) \quad (4)$$

В таблице физических свойств (см. Приложение) при t_{cp} методом интерполяции определить значение c_1 и c_2 .

$\Delta\tau$ – продолжительность одного замера, с.

1.

2.

...

n.

2. Определить тепловой поток Q_1 , (Вт) воспринимаемый теплоносителем в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_1 = G_1 c_1 (t_{1к} - t_{1н}) = \quad \text{Вт}, \quad (5)$$

где G_1 – расход теплоносителя, кг/с;

Для случая естественной конвекции теплоносителя в рубашке, Q_1 определить по формуле (3) подставив соответствующие значения M_1 , c_1 , и $(t_{1к} - t_{1н})$;

$t_{1н}, t_{1к}$ – начальная и конечная температура теплоносителя, °С.

1.

2.

...

n.

3. Определить суммарные тепловые потери Q_n в течении каждого промежутка времени $\Delta\tau_i$:

$$Q_n \approx Q - (Q_1 + Q_2). \quad (6)$$

1.

2.

...

n.

3. Определить среднюю движущую силу процесса теплопередачи, в случае нагревания жидкости по формуле:

$$\Delta t_{cpi} = \frac{t_{1k} - t_{1n}}{\ln(t_{1n} - t_{2n}) / (t_{1k} - t_{2n})} \frac{A - 1}{A \cdot \ln A}, \quad (7)$$

где $A = (t_{1n} - t) / (t_{1k} - t_{1n})$;

t – температура продукта в конце каждого временного интервала, °C.

1.

2.

...

n.

4. Рассчитать опытные значения коэффициента теплопередачи в после каждого замера по формуле:

$$K_{on\ i} = \frac{Q_{2i}}{F \Delta t_{cpi} \Delta \tau_i}, \quad (8)$$

1.

2.

...

n.

5. Определить среднюю скорость движения теплоносителя в рубашке в случае циркуляции

$$\nu = \frac{G_1}{3600 \rho S}, \text{ м/с}, \quad (9)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³ (см. табл. приложений);
 S – сечение для прохода теплоносителя:

$$S = \frac{\pi(D_p^2 - D_a^2)}{4} = \text{м}^2 \quad (10)$$

1.

2.

...

п.

6. Определить критерий Рейнольдса для теплоносителя:

$$Re = \frac{\nu h_p}{\nu}, \quad (11)$$

где ν – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с. (см. табл. приложений).

1.

2.

...

п.

Определяющим геометрическим размером является высота вертикальной поверхности теплообмена, для горизонтальных труб – их диаметр. Определяющая температура – средняя температура теплоносителя.

7. Определить коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке аппарата по уравнениям (12,17,18,19).

Для расчета числа критерия Нуссельта при вынужденном движении потока в прямых трубах или каналах можно рекомендовать следующие уравнения:

а) для ламинарного режима движения теплоносителя, $Re \leq 2320$:

$$Nu_1 = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

где Pr – критерий Прандтля для жидкости по t_{cp} из таблиц приложения.

Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T h^3}{\nu^2}, \quad (13)$$

1.

2.

...

п.

здесь g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, K^{-1} ;
для капельной жидкости:

$$\beta \approx \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho}{\rho_{\text{ж}}(t - t_{\text{ж}})} \quad (14)$$

здесь $\rho, \rho_{\text{ж}}$ – плотность прогретой и холодной жидкости, кг/м^3 ;

$t, t_{\text{ж}}$ – температура прогретой и холодной жидкости, $^{\circ}\text{C}$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

1.

2.

...

п.

Δt – расчетный температурный напор (разность температуры жидкости и стенки), K ;

$$\Delta t = t_{\text{ж}} - t_{\text{cm}} \quad (15)$$

1.

2.

...

п.

Pr_{cm} – критерий Прандтля пристеночной области (берется из таблиц приложений по температуре стенки);

$$t_{\text{cm}} = 0,5(t_{\text{cp1}} + t_{\text{cp2}}), \quad (16)$$

здесь $t_{\text{cp1}}, t_{\text{cp2}}$ – средние температуры теплоносителя и продукта в рубашке, $^{\circ}\text{C}$.

1.

2.

...

п.

б) для переходного режима движения теплоносителя $2320 \leq Re < 10000$:

$$Nu_1 = C \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (17)$$

Значение коэффициента C определяется из таблицы 1.2 в зависимости от величины критерия Рейнольдса.

Таблица 1.2

Значение коэффициента C

$Re \cdot 10^{-3}$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
C	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6	10,3	15,5	19,5	27,0	33,0

Для приближенных расчетов можно пользоваться уравнением:

$$Nu_1 = 0,008 \cdot Re^{0,9} Pr^{0,43}, \quad (18)$$

в) для турбулентного режима движения теплоносителя $Re \geq 10000$

$$Nu_1 = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (19)$$

1.

2.

...

п.

8. Для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции в рубашке использовать критериальное уравнение следующего вида:

$$Nu_1 = B (Gr \cdot Pr)^n (Pr / Pr_c)^{0,25} \quad (20)$$

где Gr – критерий Грасгофа, характеризующий подъёмную силу при конвекции потоков теплоносителя определить по формулам (13) – (16).

Значения коэффициента B и показателя степени n принимается в зависимости от произведения $Gr \cdot Pr$. Для вертикальной трубы при $Gr \cdot Pr = 10^3 - 10^9$ $B = 0,76$ $n = 0,25$; при $Gr \cdot Pr > 10^9$ $B = 0,15$ $n = 0,333$;

9. Определить безразмерный коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к продукту по следующим критериальным уравнениям:
- с использованием мешалки.

$$Nu_2 = 0,36 Re_{\text{м}}^{0,67} Pr^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{см}}} \right)^{0,14} \Gamma, \quad (21)$$

где $Re_{\text{м}}$ – модифицированный критерий Рейнольдса:

$$Re_{\text{м}} = \frac{nd_{\text{м}}^2 \rho}{\mu} \quad (22)$$

1.

2.

...

n.

здесь n – частота вращения мешалки, с^{-1} ;

$d_{\text{м}}$ – диаметр мешалки, м;

μ – вязкость перемешиваемой среды при средней температуре, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

Γ – симплекс геометрического подобия:

$$\Gamma = \frac{d_{\text{м}}}{D_a} = \quad , \quad (23)$$

здесь D_a – диаметр аппарата, м;

$\mu_{\text{ст}}$ – вязкость среды при температуре стенки нагревателя. $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Pr – критерий Прандтля для продукта по $t_{\text{ср}}$ из таблиц приложения.

1.

2.

...

n.

- без использования мешалки.

$$Nu_2 = C(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n (\text{Pr} / \text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25} \quad (24)$$

при естественной конвекции продукта в аппарате критерий Грасгофа определить по формулам (13-16) по соответствующим температурам продукта в аппарате, за характерный размер принять h (см. рис. 2)

Значения коэффициента C и показатель степени n зависит от режима и определяется из таблицы 1.3

Таблица 1.3

Значения коэффициента C и показателя степени n

Режим	$Gr \cdot Pr$	C	n
Ламинарный	$1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^2$	1,18	0,125
Переходный	$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
Турбулентный	$2 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^{12}$	0,185	0,33

9. Определить значения коэффициентов теплоотдачи, соответственно, от горячего теплоносителя к разделяющей стенке α_1 и от стенки к продукту α_2 по формуле:

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{l}; \quad \alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{l}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (25)$$

где l – характерный размер, м, (принять $l = h$);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

- | | |
|-----|-----|
| 1. | 1. |
| 2. | 2. |
| ... | ... |
| п. | п. |

10. Определить теоретическое значение коэффициента теплопередачи по выражению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (26)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \left(r_{заг.1} + \frac{\delta_1}{\lambda_{cm1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{cm2}} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_{cmn}} + r_{заг.n+1} \right)$ – сумма термических сопротивлений всех слоев стенки, включая термические сопротивления загрязнений внутренней и наружной стенок теплообменной поверхности $r_{заг.1}$, $r_{заг.n+1}$, (м²·К/Вт).

Для воды можно принять $1/r_{заг.1} = 1/r_{заг.n+1} = 1600$ (Вт/м²·К).

δ – толщина стенки, м;

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки, ($\lambda_{cm} = 16 \dots 18$), Вт/(м·К).

- | |
|----|
| 1. |
| 2. |

...

п.

Таблица 1.4

Результаты расчетов.

№ п/п	Время, мин	$\Delta t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$K_{\text{оп}},$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$\alpha_1,$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$\alpha_2,$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$K,$ $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$
1						
2						
.						
п						

11. Построить графики зависимости коэффициентов $K_{\text{оп}} = f(\Delta\tau)$, $\alpha_1 = f(\Delta\tau)$, $\alpha_2 = f(\Delta\tau)$, $K = f(\Delta\tau)$ от времени.

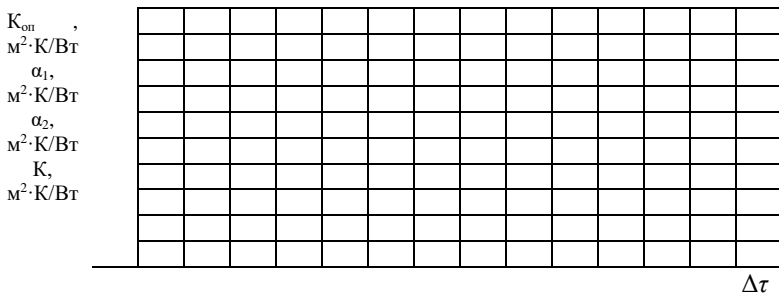


Рисунок 3 – График зависимостей $K_{\text{оп}} = f(\Delta\tau)$, $\alpha_1 = f(\Delta\tau)$, $\alpha_2 = f(\Delta\tau)$, $K = f(\Delta\tau)$.

12. Сравнить опытное и расчетное значения коэффициента теплопередачи, сделать выводы по работе.

Выводы:

Работу выполнил:
(подпись)

Работу принял: _____
(подпись)

Лабораторная работа № 4

Исследование сушки влажного материала в СВЧ сушильной установки

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 4.1- Данные расчетов и результатов опыта

№ п/п	Время опыта τ , с.	Масса матери- ала		G_B , г	W , %	$t_{\text{продукта}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{внутри}}$ камеры, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{снаружи}}$ камеры, $^{\circ}\text{C}$
		G_n , г	G_k , г					
Исх.	0							
1	30							
2	60							
3	90							
4	120							
5	150							
6	180							
7	210							
8	240							

Методика расчета

1. $G_B = G_n - G_k$

2. $W_{\text{исх}} = ((G_{n1} - G_{kn}) / G_{n1}) \cdot 100\%$

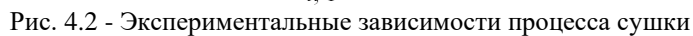
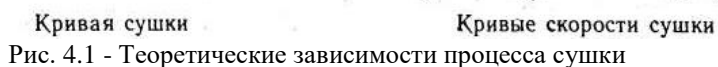
где $G_{n1} - G_{kn} = G_{B \text{ полн.}}$

3. $W_1 = ((G_{B \text{ полн.}} - G_{B1}) / G_{n1}) \cdot 100\%$

где $G_{B \text{ полн.}} - G_{B1} = G_{W1}$

4. $W_2 = ((G_{W1} - G_{B2}) / G_{n1}) \cdot 100\%$

где $G_{W1} - G_{B2} = G_{W2}$



30

Лабораторная работа №5

Экспериментально-теоретическое исследование планетарного смесителя

Содержание работы

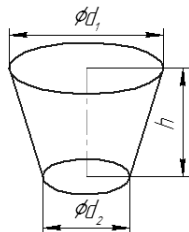
1. Определить мощность привода рабочего органа.
2. Определить производительность машины.
3. Составить кинематическую схему машины.

Оборудование: смеситель KENWOOD, контрольно-измерительный прибор (амперметр, вольтметр) MASTER KIT, весы лабораторные BM 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 ₁ , м	d ₂ , м	h, м	V, м ³

$$V = \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2) \quad (1)$$

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 1. Протокол испытаний № 1

№	Время опыта τ , 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					
4	40					
5	50					

10. Определить массовую долю каждого компонента в пробе по формуле:

$$m_i = \frac{M_i}{M_{np}} \cdot 100\% \quad (2)$$

11. Определить коэффициент однородности смеси

$$\varepsilon = 1 + \left(1 - \frac{m_1}{m_{01}}\right) \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_{02}}\right) \quad (3)$$

где m_{01}, m_{02} – массовые доли в исходной смеси, %.

12. Определить мощность привода рабочего органа N, Bm

$$N = U \cdot I \quad (4)$$

Полученные данные занести в таблицу 2.

Таблица 2. Обработка экспериментальных данных

№	Массовые доли компонентов		Коэффициент однородности смеси, ε	Мощность привода, N, Bm	Средняя мощность, N_{cp}, Bm
	$m_1, \%$	$m_2, \%$			
1					
2					
3					
4					
5					

13. Построить график зависимости коэффициента однородности смеси ε , от продолжительности смешивания τ, c .

ε												

τ, c

14. По графику определить продолжительность смешивания τ_n, c

15. Определить производительность смесителя с учетом загрузки чаши.

$$W = \frac{V \cdot \rho_{cm} \cdot \varphi}{\tau_n} \quad (5)$$

где V – геометрический объем чаши, m^3 ;

$\rho_{см}$ – насыпная плотность смеси, кг/м³ (масса определенного объема);

$$\rho_{см} = \frac{m_{01} \cdot \rho_1 + m_{02} \cdot \rho_2}{100} \quad (6)$$

φ – коэффициент загрузки

$$\varphi = \frac{V_{см}}{V} = \frac{M_{см}}{\rho_{см} \cdot V} \quad (7)$$

16. Опыт повторить, засыпав по 300 г крупы в чашу смесителя (см. п.4-15)

17. Опыт повторить, засыпав по 500 г крупы в чашу смесителя (см. п.4-15)

18. По полученным значениям построить зависимости мощности привода N , производительности машины W , и продолжительности смешивания τ_n от коэффициент а загрузки φ .

N , $Вт$	W , $кг/с$	τ_n , $с$												

φ

19. Проанализировав построенные зависимости, сделать выводы по работе

Вывод: _____

Дата _____

Подпись преподавателя: _____

Составитель Мезенов Артем Анатольевич

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

Рабочий журнал предназначен для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям: Агроинженерия; Продукты питания животного происхождения; Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции; Технология продукции и организация общественного питания.