

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

А.Н. ХОЛОДИЛИН, С.Ю. СОЛОВЫХ, Р.Ф. САГИТОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ "ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ"

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования на факультете пищевых производств.

Оренбург 2008

УДК 664 (07)
ББК 36.81 я73
Х73

Рецензент
доктор технических наук, профессор В.Ю.Полищук

Х 73 **Холодилин А.Н.**
Лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты
пищевых производств»: учебное пособие/ А.Н. Холодилин, С.Ю.
Соловых, Р.Ф. Сагитов – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. - 106 с.
ISBN

Лабораторный практикум предназначен для проведения лабораторных работ и включает работы по гидромеханическим, механическим, теплообменным процессам. В работах изложены основы теории и расчета параметров процессов, даны методики проведения экспериментов и обсчета полученных результатов.

ISBN

ББК 36.81 я73

© Холодилин А.Н.,
Соловых С.Ю.,
Сагитов Р.Ф., 2008
© ГОУ ОГУ, 2008

Содержание

Порядок выполнения лабораторных работ.....	3
1 Лабораторная работа № 1 – Исследование процесса гравитационного осадения.....	5
2 Лабораторная работа № 2 – Определение дисперсности сыпучих материалов.....	15
3 Лабораторная работа № 3 – Исследование процесса перемещения частицы по внутренней поверхности вращающегося цилиндра.....	21
4 Лабораторная работа № 4 – Исследование влияния кинематических и установочных параметров на эффективность процесса сепарирования на плоских решетках, совершающих возвратно-поступательные колебания.....	29
5 Лабораторная работа № 5 – Определение физико-механических свойств сыпучих продуктов.....	39
6 Лабораторная работа № 6 – Исследование процесса перемешивания в аппаратах с вращающимися мешалками.....	45
7 Лабораторная работа № 7 – Исследование процесса псевдооживления... ..	58
8 Лабораторная работа № 8 – Определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате типа «труба в трубе».....	68
9 Лабораторная работа № 9 - Испытание теплообменника в режимах прямотока и противотока теплоносителей и выбор его теплоизоляции.....	82
10 Лабораторная работа № 10 – Изучение тепловых процессов в пластинчатом теплообменном аппарате.....	94
Приложение А.....	101
Приложение Б.....	102
Приложение В.....	103
Приложение Г.....	104
Приложение Д.....	105

Порядок выполнения лабораторных работ

1. Студенты могут приступить к занятиям в лаборатории процессов и аппаратов пищевых производств только после инструктажа по технике безопасности, который проводится преподавателем на первом занятии. После инструктажа студенты расписываются в журнале по технике безопасности и противопожарной безопасности.

2. Студенты должны заблаговременно подготовиться к выполнению работы, для чего, прежде всего, следует изучить соответствующие основы теории процессов и аппаратов по конспекту лекций, учебникам и данному практикуму. Кроме этого необходимо усвоить цель работы, устройство лабораторной установки, методику и последовательность выполнения измерений.

3. Перед началом работы каждый студент опрашивается преподавателем для выяснения теоретической подготовки. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

При защите работы студент должен показать знания физики изученного вопроса, порядок проведения работы и ответить на контрольные вопросы.

4. По результатам работы каждый студент оформляет отчет в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оформлению курсовых и дипломных работ.

Отчет по лабораторной работе оформляется на листках бумаги А4 формата (210*297мм) и должен содержать:

- а) титульный лист с названием лабораторной работы;
- б) цель лабораторной работы;
- в) схему лабораторной установки;
- г) таблицы опытных и расчетных величин;
- д) расчеты;
- е) необходимые графики, выполненные на миллиметровой бумаге;
- ж) выводы о проведенной работе.

5. После окончания работы студенты должны убрать свои рабочие места, сдать все инструменты лаборанту, представить преподавателю экспериментальные данные.

6. Выполненную и оформленную работу студенты обязаны защитить в сроки, предусмотренные учебным планом. График выполнения и защиты лабораторных работ доводится до сведения студентов на первом занятии.

7. Студенты, пропустившие лабораторные занятия и не выполнившие лабораторную работу, должны ее отработать. График отработки вывешивается на доске объявлений кафедры.

1 Лабораторная работа № 1

Исследование процесса гравитационного осаждения

Цель работы. Изучение теории осаждения частиц в жидкой среде. Экспериментальное исследование влияния плотности, формы, размеров частиц и физических свойств жидкости на скорость осаждения частиц. Определение констант основного уравнения отстаивания, а также коэффициента сопротивления среды.

1.1 Теоретические положения

В пищевых производствах при проведении различных технологических процессов часто образуются неоднородные системы, которые необходимо разделить на фазы. Одним из методов разделения неоднородных систем является отстаивание под действием силы тяжести.

Отстаивание применяют для разделения суспензий, эмульсий, пылей и дымов. Сущность процесса заключается в том, что неоднородная система, находящаяся в аппарате в состоянии покоя, или движущаяся в нем с малой скоростью, разделяется на составные части под действием силы тяжести. Небольшая скорость осаждения частиц при отстаивании не обеспечивает выделения из смеси тонкодисперсных частиц и поэтому отстаивание, как правило, применяют для грубого разделения неоднородных систем. Основными показателями, характеризующими процесс отстаивания, являются скорость осаждения частиц, линейная скорость потока, время пребывания потока в аппарате и качество получаемых фракций.

1.1.1 Силы, действующие на частицу

Если поместить частицу в жидкую или газообразную среду (рисунок 1.1), то на нее будут действовать сила тяжести G и сила гидростатического давления среды. Равнодействующая сил гидростатического давления направлена вверх и обычно называется подъемной силой A .

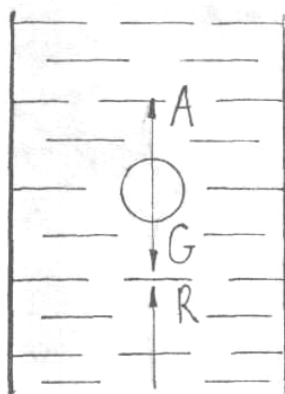


Рисунок 1.1 – Схема сил, действующих на частицы

Сила тяжести определяется по формуле

$$G = g \cdot V \cdot \rho_c \quad G = g \cdot V \cdot \rho_c \quad (1.1)$$

где V – объем частицы, м^3 ,

ρ_c – плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$,

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Подъемную силу можно вычислить по формуле:

$$A = \rho_c \cdot V \cdot g \quad (1.2)$$

где ρ_c – плотность среды, в которой находится частица, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Если плотность частицы меньше плотности среды, то подъемная сила будет больше силы тяжести. В этом случае равнодействующая сил направлена вверх, поэтому частица будет перемещаться вверх – всплывать. Если же плотность частицы больше плотности среды, то частица будет перемещаться вниз – осаждаться.

При движении частицы, со стороны среды возникает сила сопротивления R , которая приложена к частице и направлена в сторону, противоположную движению. Величина этой силы пропорциональна скорости движения частицы и зависит от формы, размеров частиц и физических свойств среды.

Сила сопротивления R возникает в основном в результате причин:

- трения поверхности о среду;
- появление некоторого разряжения за частицей, что приводит к возникновению вихрей;
- лобового давления среды на частицу.

$$R = R_D + R_{mp} + R_p \quad (1.3)$$

где R_D – сила динамического сопротивления (сила лобового давления), Н,

R_{mp} – сила трения, Н,

R_p – сила сопротивления, образующаяся за счет разряжения за частицей, Н.

R_{mp} , R_p R_D определить очень сложно, т.к. их величина зависит от многих факторов. Поэтому, для определения силы сопротивления пользуются следующим уравнением:

$$R = \xi \cdot R_D \quad R = \xi \cdot R_D \quad (1.4)$$

где ξ ξ – коэффициент сопротивления.

Сила динамического сопротивления проявляется в результате того, что

движущаяся частица вытесняет перед собой часть среды, сообщая ей энергию, при этом скорость вытесняемой среды увеличивается от некоторой начальной величины до конечной, равной скорости движения частицы. Известно, что изменение кинетической энергии равно работе движущей силы. Этот закон применим и для вытесненного столба жидкости

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = R_d \cdot l \quad (1.5)$$

где m – масса вытесненного столба среды, кг;

v_1, v_2 V_1, V_2 – начальная и конечная скорости вытесненной среды, м/с;

l – путь, пройденный частицей, м;

R_d R_d – сила динамического сопротивления, Н.

В отстойниках среда находится обычно в покое, следовательно, $v_1 = 0$ $V_1 = 0$

Конечная скорость вытесняемой среды равна скорости осаждения частицы, тогда $v_2 = v$ $V_2 = V$,

где v – скорость осаждения частицы, м/с.

Уравнение 1.5 примет вид:

$$\frac{mv^2}{2} = R_d \cdot l \quad (1.6)$$

Массу вытесненной среды определяют по формуле:

$$m = \rho_c \cdot S \cdot l \quad (1.7)$$

где S – площадь поперечного сечения столбика среды, равная площади сечения частицы, м².

Подставив уравнение 1.7 в 1.5, получим:

$$R_d = \rho_c \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.8)$$

Подставив значение динамической силы из уравнения (1.8) в уравнение (1.4), получим формулу для определения общей силы сопротивления

$$R = \xi \cdot \rho_c \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.9)$$

Для частиц шарообразной формы формула для определения силы сопротивления среды будет иметь вид

$$R = \rho_c \cdot \xi \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot v^2}{8} \quad (1.10)$$

где d – диаметр частицы, м.

Для решения этого уравнения необходимо иметь значение коэффициента сопротивления, который находится экспериментально. При обработке опытных данных для коэффициента сопротивления получено выражение:

$$\xi = \frac{B}{Re^z} \quad (1.11)$$

где Re – критерий Рейнольдса для обтекания средой осаждающейся частицы,

B, z – коэффициенты, определенные из опытных данных (значения меняются в зависимости от скорости осаждения).

1.1.2 Определение скорости осаждения частиц

Частица, помещенная в среду, сначала движется ускоренно, но с увеличением скорости движения возрастает сопротивление среды, что приводит к уменьшению равнодействующей силы, действующей на частицу. С некоторого момента времени равнодействующая сил станет равной нулю, и частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью, которая называется скоростью осаждения.

Рассмотрим процесс осаждения обособленной твердой шарообразной частицы в жидкости. На частицу диаметром d действует сила тяжести G , подъемная сила A и сила R сопротивления среды.

Сила тяжести частицы в объеме шара

$$G = \frac{\pi \cdot d^2}{6} \cdot \rho_c \cdot g \quad (1.12)$$

Подъемная сила

$$A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_c \cdot g \quad (1.13)$$

Движущая сила, под действием которой частица осаждается

$$P = G - A = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_c - \rho_c) \quad (1.14)$$

Исследования показывают, что существует три режима осаждения частицы: ламинарный, переходный и турбулентный. Область существования режимов осаждения определяется величиной критерия Рейнольдса, который рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{vd\rho_c}{\mu} \quad (1.15)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с,

v – скорость осаждения частицы, м/с.

Сила сопротивления R направлена в сторону, обратную движению частицы, и зависит от режима осаждения.

Критерии Рейнольдса:

– ламинарный режим $Re \leq 2$, $\xi = \frac{24}{Re}$;

– переходный режим $500 > Re > 2$, $\xi = \frac{18.5}{Re^{0.6}}$; (1.16)

– турбулентный режим $Re > 500$, $\xi = 0,44$.

При осаждении частица вначале движется ускоренно; когда сила R становится равной силе P , частица начинает осаждаться равномерно, эта постоянная скорость называется скоростью осаждения.

Таким образом, подставляя в равенство $R=P$ их значения, определим скорость осаждения

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_c) = \xi \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_c \cdot v^2}{2} \quad (1.17)$$

Откуда

$$v = \sqrt{\frac{4gd(\rho_q - \rho_c)}{3\rho_c \cdot \xi}} \quad (1.18)$$

Эта формула в зависимости от коэффициента сопротивления справедлива для любого из трех, указанных ранее, режимов осаждения.

Подставляя в нее значение $\xi = \frac{24}{Re}$ $\xi = \frac{24}{Re}$, соответствующее ламинарному осаждению, получим формулу Стокса, справедливую для $Re \leq 2$.

$$v = \frac{d^2 \cdot g(\rho_u - \rho_c)}{18\mu} \quad (1.19)$$

Если оседающая частица нешарообразна, то ее эквивалентный диаметр находят по объему V или массе частицы m , пользуясь зависимостью:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V} = 1,24\sqrt[3]{V} = 1,24\sqrt[3]{\frac{m}{\rho_u}} \quad (1.20)$$

Определение скорости осаждения по формуле 1.18 связано с некоторыми затруднениями в связи с тем, что входящий в уравнение коэффициент сопротивления среды зависит от критерия Рейнольдса, который в свою очередь зависит от скорости.

В связи с этим для расчета скорости осаждения удобнее пользоваться методом, предложенным П. В. Лященко. Решая уравнение 1.17 относительно ξ , получим

$$\xi = \frac{4gd(\rho_u - \rho_c)}{3\rho_c v^2} \quad (1.21)$$

Умножим обе части уравнения на Re^2 , после упрощения получим

$$Re^2 \cdot \xi = \frac{4d^3(\rho_u - \rho_c)\rho_c \cdot g}{3\mu^2} \quad (1.22)$$

Правая часть полученного уравнения является видоизмененным критерием Архимеда, а, следовательно

$$Re^2 \cdot \xi = \frac{4}{3} Ar \quad (1.23)$$

Подставив в эту зависимость значения ξ для соответствующих режимов осаждения, находят граничные значения критерия Архимеда.

Для ламинарного режима после подстановки значения получим

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (1.24)$$

В связи с этим при $Re=2$ верхнее предельное значение критерия $Ar=36$. Следовательно, ламинарный режим осаждения соответствует условию $Ar \leq 36$.

В переходной области

$$Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715} \quad (1.25)$$

Критическое значение критерия Архимеда, соответствующее значению $Re=500$ будет $Ar=83000$. Следовательно, существование переходного режима ограничивается изменением критерия Архимеда в пределах $36 < Ar < 83000$.

В турбулентном режиме

$$Re = 1,74 \cdot Ar^{0,5} \quad (1.26)$$

критерий $Ar > 83000$.

Критериальные зависимости $Re = \frac{Ar}{18}$, $Re = 0,152 \cdot Ar^{0,715}$, $Re = 1,74 \cdot Ar^{0,5}$ могут быть определены в общем виде

$$Re = B \cdot Ar^m \quad (1.27)$$

где B , m - постоянные величины.

Тогда

$$\lg Re = \lg B + m \lg Ar \quad (1.28)$$

т.е. в логарифмических координатах зависимость между критериями Re и Ar выражается прямой линией при любом режиме осаждения с соответствующими значениями величин B , m .

1.2 Содержание работы

Работа заключается в экспериментальном исследовании влияния различных факторов на скорость осаждения частиц под действием силы тяжести.

Экспериментально определяем скорость гравитационного осаждения частиц различной плотности, размеров и формы в жидкости.

Изменив плотность жидкости, исследуем изменение скорости осаждения тех же частиц. Обработав экспериментальные данные, сравниваем с расчетными величинами и делаем выводы.

1.3 Оборудование

Установка состоит из трех цилиндров, заполненных жидкостями, имеющими различную плотность. Каждый цилиндр снабжен метками, позволяющими фиксировать расстояние, которое частицы проходят в процессе осаждения. Чтобы исключить влияние начального ускорения, верхняя метка расположена на расстоянии 30-40 мм ниже уровня жидкости. Для проведения

работы необходимы набор частиц различных диаметров и плотности, а также секундомер, микрометр, пинцет и весы.

1.4 Порядок выполнения работы

1.4.1 Определяем диаметр частиц, и результаты заносим в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Опытные и расчетные величины

Частицы			Жидкость			Время осаж-дения	Расчетные величины				
Материал	$\rho_{ч}$, кг/м ³	d, м	Назва-ние	$\rho_{с}$, кг/м ³	μ , Па·с	τ , с	ν , м/с	Ar	$Re_{экс}$	$Re_{теор}$	Δ

$$\Delta = \frac{Re_{теор} - Re_{экс}}{Re_{теор}} \cdot 100\% \quad (1.29)$$

1.4.2 Частицы берем пинцетом, осторожно вводим в жидкость и отпускаем.

1.4.3 Секундомером фиксируем время прохождения частицей отмеренного расстояния.

Всего проводим не менее 15 опытов, причем каждый опыт проводим в 3-5 повторностях и определяем среднее значение времени осаждения частицы. Если частица коснулась стенок сосуда или к ней прилип пузырек воздуха, то такой опыт не засчитывается и проводится заново.

1.4.4 Рассчитаем скорость осаждения частицы в каждом опыте исходя из длины пути и измеренного времени осаждения.

1.4.5 Определяем значения критериев.

1.4.6 На миллиметровой бумаге строим график $lgRe = f(lgAr)$

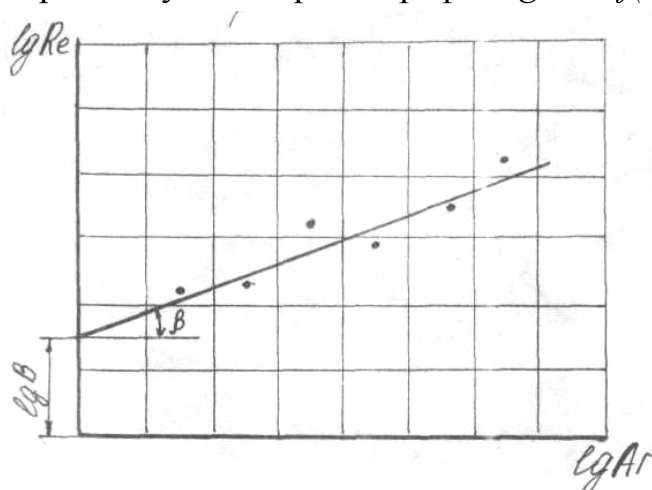


Рисунок 1.2 – График зависимости $lgRe=f(lgAr)$

Через точки на графике (рисунок 1.2) проводим прямую. Из графика находим величины m и $lg B$. При этом $m = tg\beta$, где β – угол наклона прямой к оси абсцисс. Коэффициент сопротивления среды определяем из уравнения 1.16.

1.4.7 Для получения расчетной зависимости между величинами Ar и Re опытные данные необходимо обобщать. Это возможно на основе метода наименьших квадратов.

Для удобства приведем формулу (1.28) к виду

$$y = S + mx \quad (1.30)$$

где $y = lg Re$, $S = lg B$, $x = lg Ar$.

Нахождение коэффициентов из этого уравнения производится методом наименьших квадратов отклонений опытных значения y_i от расчетных y_i^* по формуле (1.31)

$$\sum_1^n (y_i - y_i^*) \Rightarrow \min \quad (1.31)$$

или, с учетом 1.30

$$\sum_1^n (y_i - S - m \cdot x_i)^2 \Rightarrow \min \quad (1.32)$$

Данное условие выполнено при равенстве нулю частных производных

$$\begin{cases} \frac{d}{dS} \sum_1^n (y_i - S - m \cdot x_i)^2 = 0 \\ \frac{d}{dm} \sum_1^n (y_i - S - m \cdot x_i)^2 = 0 \end{cases} \quad (1.33)$$

Отсюда получим систему уравнений для расчета значений S и m

$$\begin{cases} \sum_1^n y_i = m \cdot \sum_1^n x_i + S \cdot n \\ \sum_1^n y_i \cdot x_i = m \cdot \sum_1^n x_i^2 + S \cdot \sum_1^n x_i \end{cases} \quad (1.34)$$

где i - номер опыта,
 n - общее число опытов.

Для решения этой системы составляем таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Экспериментальные данные

№	Re	Ar	$y=\lg Re$	$x=\lg Ar$	$x \cdot y$	x^2
1						
			$\sum_{i=1}^n y_i =$	$\sum_{i=1}^n x_i =$	$\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i =$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 =$

В нее заносим значения Re и Ar , соответствующие какому-либо одному режиму осаждения. Затем находим для каждого опыта y , $x \cdot y$, x^2 и их суммы.

Подставляя рассчитанные значения данных сумм в систему уравнений (1.34), находим величины S и m . Коэффициент B определяем потенцированием $B=10^S$. После этого подставляем значения B и m в уравнение 1.27 и его сравниваем с уравнениями 1.24 и 1.25 и 1.26.

На основании сравнения делаем выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Неоднородные системы и их классификация.
2. Методы разделения неоднородных систем.
3. Основные показатели, характеризующие процесс отстаивания.
4. Движущая сила процесса осаждения.
5. Факторы, влияющие на скорость осаждения частиц в гравитационном поле.
6. Возможные пути интенсификации процесса осаждения в гравитационном поле.
7. Влияние формы частиц и концентрации суспензии на процесс гравитационного осаждения.
8. Расчетные формулы.
9. Методика проведения эксперимента.

Список литературы

1. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]/В.Н. Стабников, В.М. Лысянкий, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985 – 503с.
2. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии. [Текст]/ П.Г. Романков, М.И. Курочкина – Л.: Химия, 1974 – 289 с.
3. Плаксин Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст] : учеб. для вузов / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин.- 2-е изд. перераб. и доп. - М. : Колос, 2005. - 760 с.

2 Лабораторная работа № 2

Определение дисперсности сыпучих материалов

Цель работы. Знакомство с устройством и принципом работы лабораторного сепаратора-анализатора, определение влияния продолжительности процесса сепарирования на эффективность процесса разделения сыпучего материала, приобретение навыков определения размеров частиц дисперсного материала.

2.1 Теоретические положения

Сыпучие материалы в зависимости от размеров частиц можно разделить на 5 групп:

1. Кусковые $d_{\max} > 10$ мм.
2. Крупнозернистые $d_{\max} = 2 \dots 10$ мм.
3. Мелкозернистые $d_{\max} = 0,5 \dots 2$ мм.
4. Порошкообразные $d_{\max} = 0,05 \dots 0,5$ мм.
5. Пылевидные $d_{\max} \leq 0,05$ мм.

Важнейшей характеристикой сыпучих материалов является дисперсность $1/d$. Дисперсность определяет технологические свойства сыпучего материала и может быть выражена функцией распределения частиц (зерен) по крупности или удельной поверхности частиц (удельной поверхностью частиц называют отношение поверхности частиц к их объему или массе). Измерение крупности частиц сыпучих материалов является одним из важнейших методов производственного контроля процессов, особенно связанных с использованием порошкообразных и пылевидных продуктов. В промышленной практике принято характеризовать сыпучий материал по составу распределения его частиц, по размерам, определяемым ситовым анализом.

Результаты ситового анализа представляют графически в виде дифференциальной кривой распределения, показывающей процентное содержание отдельных фракций в материале, либо в виде интегральной кривой распределения, изображающей суммарное процентное содержание всех фракций меньше (или больше) данного размера.

Фракция, представленная на графике точкой (рисунок 2.2), соответствует среднему размеру зерен в ней определенному как среднее арифметическое между размерами отверстий двух соседних сит (через одно отверстие фракция прошла, а на другом задержалась).

Средний размер частиц рекомендуется выражать через средневзвешенный диаметр, определяемый из соотношения

$$d_{cp} = m_1 d_1 + m_2 d_2 + \dots + m_n d_n = \sum m_i d_i \quad (2.1)$$

где m_1, m_2, \dots, m_n – содержание каждой фракции в пробе дисперсного материала, массовые доли;

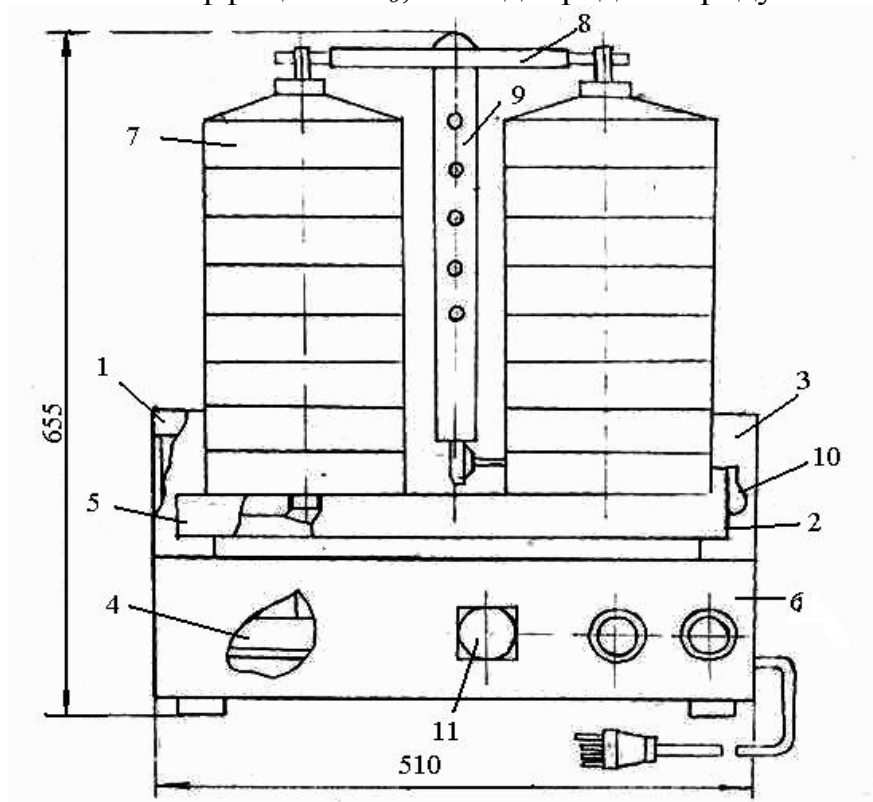
d_1, d_2, \dots, d_n – средний размер частиц данных фракций (среднеарифметическое значение отверстий сита, через которые данная фракция прошла, и сита, на котором она задержалась);

i – число фракций.

Характеристикой однородности состава дисперсного материала служит коэффициент отклонения, определяемый следующим образом. Из размера отверстий сита d_{84} , отвечающего содержанию 84 % на интегральной кривой остатков, вычитают размер отверстия d_{16} , соответствующий содержанию 16 % на той же кривой; полученную разность делят на удвоенный диаметр d_{50} , умножают на 100, т.е.

$$R_0 = \frac{d_{84} - d_{16}}{2d_{50}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Таким образом, при определении R_0 из общей массы анализируемого материала (навески) отбрасывают 16 % наиболее мелких и 16 % наиболее крупных частиц, и в расчет принимают только оставшиеся 2/3 сыпучего материала. Чем меньше коэффициент R_0 , тем однороднее продукт.



1 - привод; 2 - платформа; 3 - корпус; 4 - редуктор; 5 - кривошип; 6 -

электропанель; 7 - набор сит; 8 - несущее коромысло; 9 - штанга; 10 - рукоятка; 11 - реле времени.

Рисунок 2.1 – Схема лабораторного рассева-анализатора

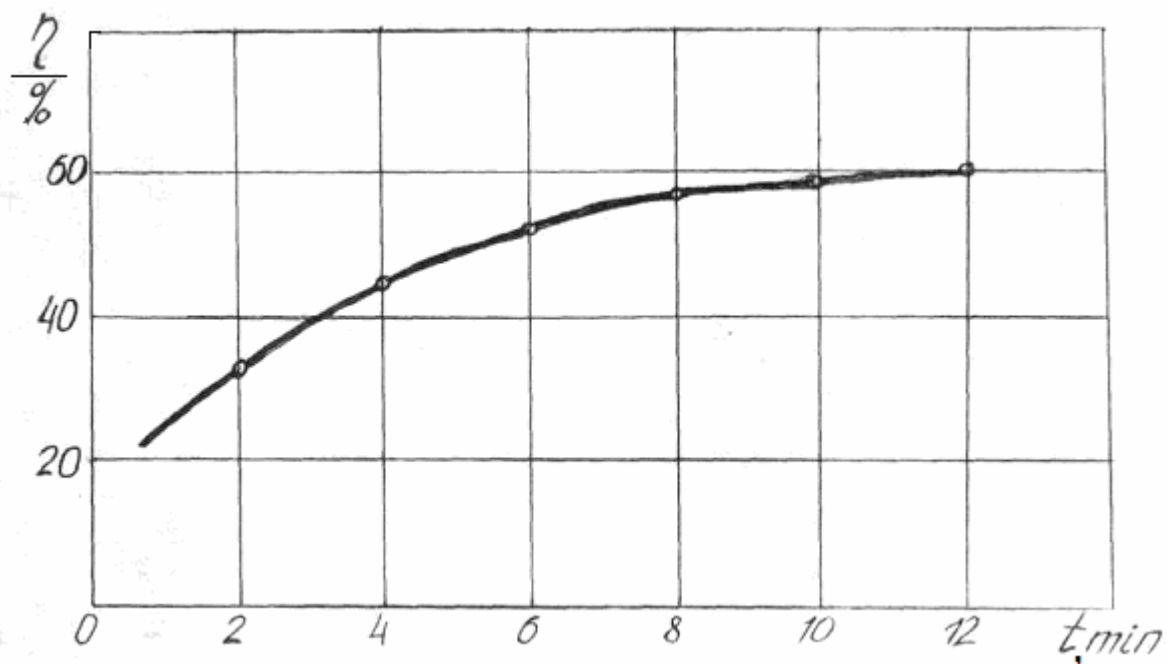
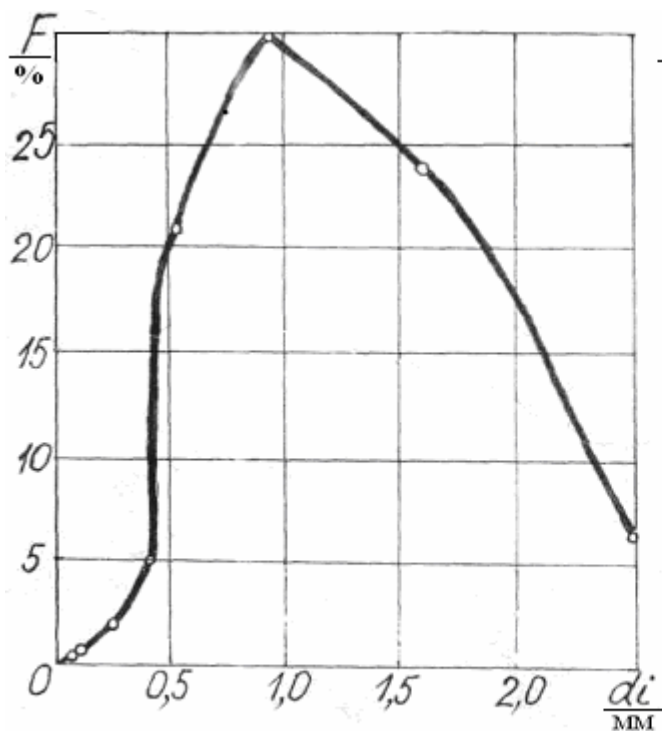
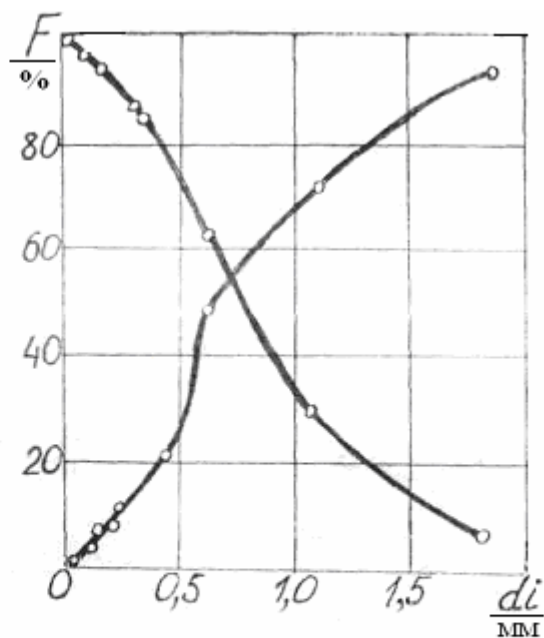


Рисунок 2.2 – График зависимости $z = f(t)$



а)



б)

а – дифференциальная кривая распределения; б – интегральные кривые распределения

Рисунок 2.3 – Результаты ситового анализа

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные

№ опыта	Продолжительность опыта, с	Распределения по ситам	Q_{np} , кг	η , %
I	600	Ø5		
		Ø3		
		Ø2		
		Ø1		
		поддон		
II	420	Ø5		
		Ø3		
		Ø2		
		Ø1		
		поддон		
...
V	60	Ø5		
		Ø3		
		Ø2		
		Ø1		
		поддон		

Таблица 2.2 – Данные для построения дифференциальной и интегральной кривых

Размер отверстий на сите, мм	Средний размер зерна на сите, мм	Содержание зерен по фракции		Интегральные характеристики			
				остаток на сите		проход через сито	
		г	%	г	%	г	%

2.2 Содержание работы

Работа заключается в экспериментальном исследовании влияния времени сепарирования на эффективность процесса разделения сыпучего материала, выборе оптимальной продолжительности сепарирования, проведение ситового анализа и определении среднего размера частиц и коэффициента отклонения.

2.3 Оборудование

На рисунке 2.1 изображена схема лабораторного отсева-анализатора РА-5М, который состоит из набора сит 7, закрепленных на платформе 2 с помощью несущего коромысла 8 и штанги 9, соединенной с рукояткой 10, корпуса 3, на котором расположен привод 1 с редуктором 4 и кривошип 5, сообщающий платформе 2 круговые колебания в горизонтальной плоскости. На электропанели 6 расположено реле времени 11, обеспечивающее продолжительность сепарирования от 1 до 10 мин.

2.4 Порядок выполнения работы

2.4.1 Ознакомиться с устройством и принципом работы экспериментальной установки.

2.4.2 Установив обечайки на платформу отсева, помещаем на ситовую поверхность 100-граммовую навеску сыпучего материала, закрываем и закрепляем с помощью коромысла.

2.4.3 По заданию преподавателя включаем сев на 10 минут.

2.4.4 После окончания просеивания каждую проходовую фракцию взвешиваем на технических весах с точностью до 0,01 г и определяем массу частиц проходового компонента, содержащуюся в навесках.

2.4.5 Тщательно смешиваем каждую проходовую фракцию с соответствующим остатком на сите и высыпаем навески на ситовую поверхность.

2.4.6 С помощью реле, ступенчато изменяем время сепарирования и определяем влияние продолжительности сепарирования на эффективность выделения проходовых частиц.

2.4.7 Эффективность процесса сепарирования (выделение проходовых частиц) оцениваем коэффициентом извлечения частиц проходового компонента в проход, данные заносим в таблицу 2.1

$$\eta = \frac{Q_{np}}{Q_{np}^0} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

где Q_{np} – масса частиц проходового компонента, содержащаяся в проходовой фракции, кг;

Q_{np}^0 – общая масса частиц проходового компонента, содержащаяся в навеске, кг.

2.4.8 По результатам исследования строим график зависимости (рисунок 2.2) и определяем рациональную продолжительность сепарирования для проведения ситового анализа.

2.4.9 По указанию преподавателя устанавливаем набор сит.

2.4.10 Навеску анализируемого материала (100 – 200 г) помещаем на верхнее сито, закрываем крышкой и весь набор закрепляем на платформе

рассева.

2.4.11 Установив на реле времени продолжительность сепарирования, определенную из предыдущего опыта, включаем установку.

2.4.12 После окончания процесса каждую фракцию с соответствующего сита взвешиваем на технических весах с точностью до 0,01 г и заносим в отчетную таблицу 2.2.

Суммарная масса всех фракций не должна отклоняться от массы исходной навески, взятой для анализа, более чем на 2 %.

2.4.13 По результатам исследований строим графики (рисунок 2.3). Процентное содержание зерен во фракции определяют из соотношения

$$F = \frac{Q_i}{Q_0} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

где Q_i - масса продукта на сите, кг;

Q_0 - масса исходной навески, кг.

Средний размер частиц рассчитываем по формуле (2.1), коэффициент отклонений – по формуле (2.2).

Контрольные вопросы

1. Какими величинами можно характеризовать дисперсность измельченного материала?
2. Как оценивается эффективность разделения сыпучего материала?
3. Как строят дифференциальную и интегральную кривые распределения частиц материала по размерам?
4. Как определяется средневзвешенный диаметр частиц?
5. Как определяется коэффициент отклонения?
6. Влияние однородности сыпучего материала на проведение различных технологических процессов?

Список литературы

1. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]/В.Н. Стабников, В.М. Лысянкий, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985 – 503с.
2. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Текст] : учеб. для вузов / под ред. А.Я. Соколова .- 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Колос, 1984. - 446 с.

3 Лабораторная работа № 3

Исследование процесса перемещения частицы по внутренней поверхности вращающегося цилиндра

Цель работы. Исследование влияния кинематических параметров на среднюю скорость перемещения частицы вдоль образующей цилиндра.

3.1 Теоретические положения

Машины с вращающимися оболочками (барабанного типа), совмещающие процесс перемещения сыпучих продуктов с их механической, тепловой и химической обработкой широко применяются в пищевой промышленности: они используются в кондитерской промышленности для покрытия конфет сахарным песком; в молочной промышленности - при производстве творога; в мясной - при мойке продуктов убоя, при засолке шкур; в пивоваренной промышленности - при проращивании зерна на солод; в зерноперерабатывающей - при сепарировании зерна и т.д..

По расположению оси цилиндра различают следующие группы машин:

- машины с горизонтальной осью вращения цилиндра: шаровые мельницы, ряд сушильных агрегатов и т.д. В этих машинах обрабатываемый продукт или вовсе не перемещается вдоль оси цилиндра, или перемещается под влиянием внешних сил (поток газа, воздействие направляющих элементов цилиндра: спиралей, лопаток и т.д.) или, наконец, под влиянием подпора непрерывно поступающего в цилиндр продукта;
- машины с наклонной осью вращения цилиндра: установки, в которых сыпучий продукт непрерывно перемещается в осевом направлении под воздействием сил тяжести продукта.

По частоте вращения цилиндра различают три группы установок:

- машины, в которых цилиндры вращаются со скоростью, приближающейся к критической скорости. Критической скоростью вращения называется такая, при которой центробежная сила, прижимая частицы продукта к стенке цилиндра, в наивысшее положение к этим машинам относятся шаровые мельницы, служащие для размола продукта. При частотах вращения, близких к критическим, шары, увлекаемые центробежной силой, поднимаются на максимальную высоту и, падая, обеспечивают наибольшую энергию удара;
- машины, в которых происходит одновременное перемешивание продукта с его тепловой (механической) обработкой, должны иметь ограниченную частоту вращения. Большие частоты вращения нежелательны во избежание измельчения и расслоения продукта;

- машины с замедленным вращением цилиндра применяются для проведения длительных во времени процессов. Частота вращения цилиндра в этом случае минимальна и составляет 1-3 оборота в час, например солодовни.

Одним из основных технологических параметров машин с медленно вращающимся наклонным цилиндром является время пребывания материала в цилиндре.

Рассмотрим процесс пересыпания материала.

В горизонтальном цилиндре, вращающемся с постоянной угловой скоростью (рисунок 3.1), изолированная частица находится под действием силы тяжести $G = m \cdot g$, силы инерции $P_u = m \omega^2 R$, нормальной реакции N , и силы трения $F = fN$.

При вращении барабана частица, находящаяся в точке А, поднимается до точки А1. Состояние относительного покоя частицы можно описать уравнениями

$$N = m \cdot \omega^2 R + m \cdot g \cdot \cos \omega t \quad (3.1)$$

$$F = fm(\omega^2 R + g \cdot \cos \omega t) = fmg \left(\frac{\omega^2 R}{g} + \cos \omega t \right) \quad (3.2)$$

$$fmg \left(\frac{\omega^2 R}{g} + \cos \omega t \right) > \sin \omega t \quad (3.3)$$

При дальнейшем подъеме наступает момент начала относительного движения частицы вниз по вращающемуся цилиндру. Угол α_1 , определяющий высоту подъема частицы, зависит от коэффициента трения и величины центробежной силы, прижимающей частицу к стенке барабана. Определяется из следующего условия

$$fmg \left(\frac{\omega^2 R}{g} + \cos \omega t \right) = \sin \alpha_1 \quad (3.4)$$

После подстановки

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \quad (3.5)$$

и преобразования получим

$$\sin(\alpha_1 - \varphi) = \frac{\omega^2 R}{g} \sin \varphi \quad (3.6)$$

или

$$\alpha_1 = \varphi + \arcsin\left(\frac{\omega^2 R}{g} \sin \varphi\right) \quad (3.7)$$

В цилиндрах с наклонной осью вращения, частица, поднявшись до точки А2, соскальзывает вниз и, благодаря наклону всего барабана на угол β , попадает уже в точку А1, снова поднимается, соскальзывает, попадая в точку А, и т.д., пока не выйдет из барабана.

В современных машинах угол наклона оси барабана принимают 1...6, реже 10 градусов.

Частоту вращения цилиндра, соответствующую началу скольжения зерновок, можно получить из выражения

$$\frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\sin(\alpha_1 - \varphi)}{\sin \varphi}; \quad (3.8)$$

$$\omega^2 = \frac{g}{R} \cdot \frac{\sin(\alpha_1 - \varphi)}{\sin \varphi}; \quad (3.9)$$

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \sin(\alpha_1 - \varphi)}{R \sin \varphi}} \quad (3.10)$$

При увеличении скорости вращения частица поднимается до точки А3, где происходит ее отрыв. Однако относительное движение частиц по цилиндру начинается всегда раньше, чем они смогут оторваться. Действительно, момент отрыва покоящейся частицы, определяемый углом α_2 , возможен при условии

$$N = m \cdot \omega^2 R + mg \cos \alpha_2 = 0 \quad (3.11)$$

откуда

$$\cos \alpha_2 = \frac{\omega^2 R}{g}; \quad (3.12)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{\omega^2 R}{g}\right) \quad (3.13)$$

При сравнении формул (3.7) и (3.13) видно, что α_1 может быть равен α_2 только в случае, если $\varphi = \frac{\pi}{2}$, что практически невозможно.

$$\varphi < \pi/2 \text{ и } \alpha_1 < \alpha_2 \quad (3.14)$$

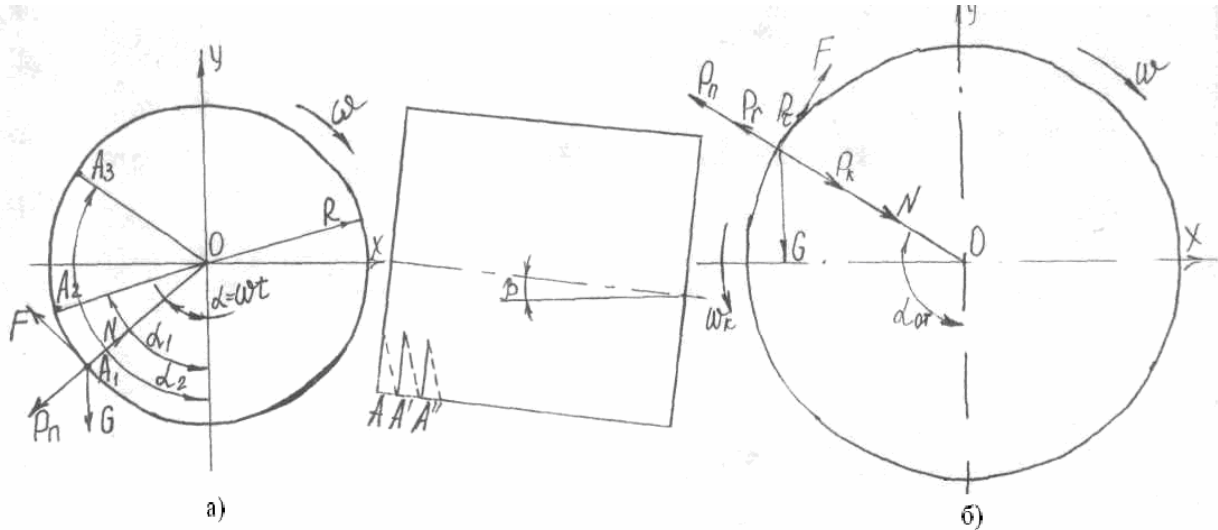
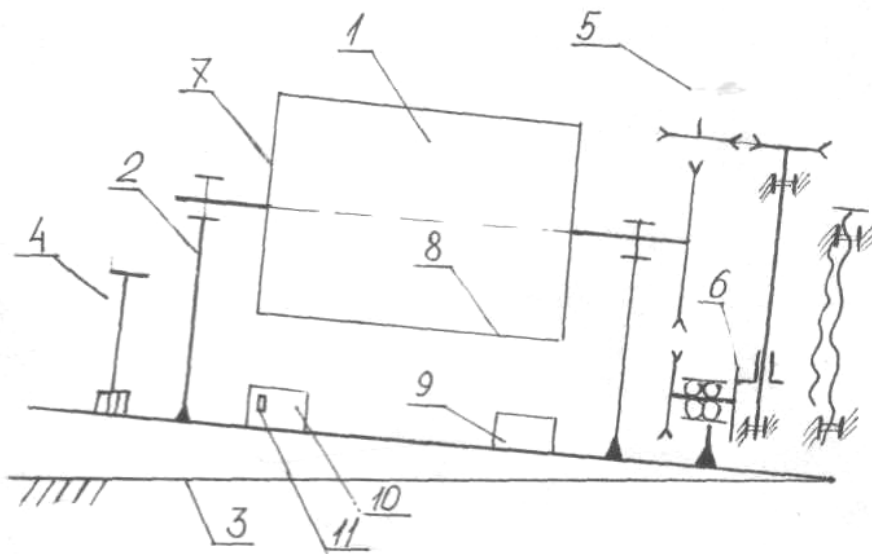


Рисунок 3.1 – Схема сил, действующих на частицу



1 – цилиндр; 2 – стойка; 3 – станина; 4 – регулировочный винт; 5 – электродвигатель; 6 – лобовой вариатор; 7 – загрузочное отверстие; 8 – разгрузочное отверстие; 9 – лоток; 10 – пульт; 11 – тумблер.

Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки

В связи с этим схема сил, действующих на частицу в момент отрыва, изменяется, в первую очередь из-за относительного ускорения и ускорения Кориолиса.

Рассмотрим момент отрыва частицы с учетом сказанного. К ранее рассмотренной схеме сил, действующих на частицу, следует добавить силы

инерции, возникающие при относительном движении частицы (рисунок 3.1 б)

$$P_r = m\omega_r^2 R; \quad (3.15)$$

$$P_r = ma_r^2 = mR \frac{d\omega_r}{d\tau} \quad (3.16)$$

и силу инерции от ускорения Кориолиса

$$P_k = 2m v_r \omega = 2mR \omega_r \omega \quad (3.17)$$

Тогда условие равновесия частицы можно записать в виде

$$N = m\omega^2 R + m\omega_r^2 R + mg \cos(\omega t - \psi) - 2mR \omega_r \omega, \quad (3.18)$$

$$T = F + P_r = fm \left[\omega^2 R + \omega_r^2 R + g \cos(\omega t - \psi) - 2\omega_r R \omega \right] + mR \frac{d\omega_r}{d\tau} \quad (3.19)$$

где ω_r – относительная угловая скорость частицы;

ψ – угол, соответствующий перемещению частицы в относительном движении.

Момент отрыва частицы от несущей поверхности определяется условием $N = 0$, т.е.

$$\omega^2 R + \omega_r^2 R + g \cos(\omega t - \psi) - 2\omega_r \omega = 0 \quad (3.20)$$

Решая это уравнение относительно ω , получим

$$\omega_r = \omega \pm \sqrt{-\frac{g}{R} \cos(\omega t - \psi)} \quad (3.21)$$

Учитывая противоположные направления переносной и абсолютной угловых скоростей, запишем значение абсолютной угловой скорости частицы

$$\omega_a = \omega - \omega_r = \pm \sqrt{\frac{g}{R} \cos(\omega t - \psi)} \quad (3.22)$$

Верхние знаки соответствуют спуску частицы, нижние – подъему. Очевидно, что отрыв частицы может быть только при подъеме. Для определения угла отрыва $\alpha_{от}$ решим уравнение. Положение частицы для некоторого момента времени определяется углом $\alpha_{от} = \omega t - \psi$

$$g \cos \alpha_{om} = -R(\omega^2 + \omega_r^2 - 2\omega_r \omega) \quad (3.23)$$

или

$$\cos \alpha_{om} = -\frac{R}{g}(\omega + \omega_r)^2 \quad (3.24)$$

и

$$\alpha_{om} = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{R}{g}(\omega - \omega_r)^2\right) \quad (3.25)$$

В практике конструирования для расчетов первого приближения все же пользуются при определении угла отрыва формулой (3.12), без учета ω_r .

При дальнейшем увеличении скорости вращения цилиндра наступает момент, когда относительное движение частицы прекращается, и она начинает вращаться вместе с цилиндром. Такую скорость называют критической и приближенно определяют из условия

$$P_u > G \Rightarrow m\omega_k^2 \geq mg \Rightarrow \omega_k \geq \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (3.26)$$

Выведенные зависимости дают возможность определить характер движения частиц по поверхности цилиндра, вращающегося с различными скоростями.

3.2 Содержание работы

Работа заключается в экспериментальном исследовании влияния частоты вращения и угла наклона цилиндра, на среднюю скорость перемещения частицы вдоль образующей цилиндра, в исследовании влияния коэффициента трения частицы на величину угла, определяющего момент начала относительного движения частицы и определении критической скорости вращения цилиндра.

Ступенчато изменяя один из параметров (ω , f , β) при постоянстве значений других, определяем время, в течение которого частица находится в цилиндре, и угол подъема, соответствующий началу относительного движения.

Полученный массив экспериментальных данных подвергается статистической обработке, сравниваем с расчетными величинами и строим графики.

3.3 Оборудование

Лабораторная установка (рисунок 3.2) состоит из прозрачного цилиндра 1, который с помощью стоек 2 крепится к станине 3. Угол наклона оси цилиндра к горизонту регулируется в установке винтом 4 в пределах 0-15 градусов. Вращение цилиндра осуществляется от электродвигателя 5. Частота вращения изменяется с помощью лобового вариатора 6. Загрузка цилиндра производится через загрузочное отверстие 7 в торце цилиндра. При вращении цилиндра частица перемещается к месту выгрузки 8 и попадает в лоток 9. На пульте 10 расположен тумблер 11 включения установки.

3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1 Знакомимся с конструкцией установки и правилами эксплуатации.

3.4.2 Планируем эксперимент по следующему алгоритму:

- а) устанавливаем интервал изменения независимых переменных;
- б) определяем необходимое число опытов;
- в) задаемся величиной интервала между независимыми переменными;
- г) определяем последовательность эксперимента;
- д) подготавливаем таблицы.

3.4.3 Установив цилиндр в горизонтальное положение, помещаем в него частицу. Включаем установку и при различных скоростях вращения цилиндра, определяем угол, соответствующий началу относительного движения частицы. Этот опыт проводим для частицы с различными коэффициентами трения.

3.4.4 Ступенчато изменяя один из параметров (угол наклона или частоту вращения цилиндра), при неизменных значениях других параметров, замеряем время нахождения частицы в цилиндре и рассчитываем скорость перемещения вдоль образующей цилиндра.

3.4.5 Проводим статистическую обработку экспериментальных данных, сравниваем их с расчетными, и строим графики зависимостей $v(\omega)$ при f и $\beta = \text{const}$; $v(\beta)$ при f и $\omega = \text{const}$; $\alpha(\omega)$ при $\beta = 0$ и $f = \text{const}$; $\alpha(f)$ при $\beta = 0$ и $\omega = \text{const}$.

Контрольные вопросы

1. Критическая скорость вращения цилиндра.
2. Абсолютное, переносное и относительное движение.
3. Конструктивные параметры, влияющие на время нахождения частицы в цилиндре.
4. Расчетные формулы

5. Порядок проведения работы

Список литературы

1. Гортинский В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин .- 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Колос, 1980. - 304 с.

2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А.Г. Касаткин.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.

3. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Текст] : учеб. для вузов / под ред. А.Я. Соколова .- 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Колос, 1984. - 446 с.

4 Лабораторная работа № 4

Исследование влияния кинематических и установочных параметров на эффективность процесса сепарирования на плоских решетках, совершающих возвратно-поступательные колебания

Цель работы. Приобретение навыков управления параметрами процесса сепарирования

4.1 Теоретические положения

Сепарирование – это процесс разделения смесей на их составные, более однородные части (фракции). На предприятиях пищевой промышленности наиболее распространенным является процесс механического разделения сыпучего материала. Основная цель механического разделения заключается в том, чтобы в процессе сепарирования выделить и сформировать фракции по таким признакам зерен (частиц), которые обеспечивают требуемое качество промежуточных и конечных продуктов.

При сепарировании сыпучего материала, вибрация – наиболее распространенный вид механического воздействия. При помощи вибраций выполняется главная задача сепарирования – перемещение частиц разделяемых фракций в различные области рабочего пространства. При вибрациях опорной и боковых поверхностей, ограничивающих сыпучее тело, силовые импульсы от частиц пограничного слоя передаются вглубь, постепенно уменьшаясь вследствие рассеяния энергии. Усилие, которое можно передать частице от смежных частиц или от твердых поверхностей, ограничивающих сыпучее тело, определяется условиями связи и зависит от направления передачи этого усилия. Если условия связи не позволяют передать частице усилие, необходимое для сообщения ей ускорения, которым располагает ограничивающая поверхность, то происходит относительное движение этой частицы. Для частиц с неодинаковыми физико-механическими свойствами или расположенных в разных точках сыпучего тела условия связи различны, а потому различны и ускорения, при которых начинается и происходит их относительное движение.

Как следствие движения частиц друг относительно друга сыпучее тело разрыхляется, и объем его увеличивается в направлении свободной поверхности. Так возникают условия для самосортирования, т.е. направленного в среднем перемещения частиц, отличающихся свойствами, в различных участках объема, занятого сыпучим телом.

Если направленное в среднем перемещение всех частиц сыпучего тела одинаково относительно ограничивающих поверхностей, то говорят, что

сыпучее тело движется потоком, и основной характеристикой этого движения называемого подачей, считают среднюю скорость частиц вдоль опорной поверхности. Таким образом, действие вибраций на сыпучее тело проявляется в разрыхлении и самосортировании этого тела, с одной стороны, и в подаче, обеспечивающей непрерывность процесса – с другой.

Подача, характеризуемая средней скоростью частиц в потоке, влияет на эффективность сепарирования обычно через толщину слоя сыпучего материала и время пребывания частиц в рабочем пространстве. При неизменной длине рабочего пространства увеличение средней скорости потока уменьшает время сепарирования и толщину слоя. Уменьшение же толщины слоя сыпучего материала чаще всего повышает эффективность сепарирования в целом, однако до определенного предела, ниже которого эффективность снижается.

Таким образом, скорость подачи при вибрационном сепарировании сыпучего материала – это основной параметр, от которого зависят производительность и четкость сепарирования. Поэтому расчетное определение средней скорости частиц сыпучего тела в потоке составляет первую задачу теории вибрационного сепарирования. Исследование этой задачи составлением и решением уравнений движения каждой частицы сыпучего материала с последующим осреднением скорости представило бы непреодолимые трудности, так как сыпучее тело пришлось бы рассматривать как механическую систему с множеством степеней свободы и сложными многообразными связями. В динамике сыпучих сред рассматриваемая задача не только не решена, но и не поставлена. Сейчас теория вибрационного перемещения достаточно полно и строго разработана только для отдельных частиц простейшей формы (плоских и сферических). Как показывают многочисленные экспериментальные данные, применение формул теории вибрационного перемещения отдельных частиц к расчету вибрационного перемещения сыпучих тел дает вполне удовлетворительную точность в достаточно больших пределах параметров процесса. Для сближения результатов применения теории вибрационного перемещения отдельной материальной частицы с действительной картиной движения сыпучих тел много значат методы экспериментального определения коэффициентов, отражающих в расчетных формулах свойства частицы и опорной вибрирующей поверхности. При движении без подбрасывания такими коэффициентами служат коэффициенты трения скольжения и покоя, а при движении с подбрасыванием – также коэффициенты мгновенного ударного трения и восстановлением нормальной скорости. Рассмотрим перемещение частицы материала без подбрасывания при прямолинейных гармонических колебаниях опорной плоскости. Составим уравнение относительного движения частицы для случая (рисунок 4.1), соответствующего относительной скорости в положительном направлении оси X

$$m\ddot{x} = P \cos \beta - G \sin \alpha - F \quad (4.1)$$

$$m\ddot{y} = P \sin \beta - G \cos \alpha + N \quad (4.2)$$

При гармонических колебаниях наклонной плоскости переносное ускорение

$$a_n = -A\omega^2 \sin \omega t \quad (4.3)$$

где A – амплитуда колебаний, м;

ω – частота колебаний, c^{-1} ,

Поэтому $P = -ma_n = mA\omega^2 \sin \omega t$

Учитывая, что $G = mg$ и $F = fN$, перепишем уравнения (4.1) и (4.2) в следующем виде

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - fN \quad (4.4)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N \quad (4.5)$$

Для относительного движения без подбрасывания $y = const$, $\ddot{y} = 0$ и $\dot{y} = 0$, что позволяет из формулы (4.5) определить нормальную реакцию

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t \quad (4.6)$$

Если нет подбрасывания, реакция N должна сохранить положительное направление за весь период колебания, даже когда второй член правой части равенства (4.6) принимает максимальное значение. Поэтому условие безотрывного движения частицы имеет вид $N > 0$

или

$$1 < Z_0 = \frac{g \cos \alpha}{A\omega^2 \sin \beta} \quad (4.7)$$

Подставляя значение N из формулы 4.6 в 4.4, после сокращения на m и элементарных преобразований получаем

$$\ddot{x} = A\omega^2 (\cos \beta + f \sin \beta) \sin \omega t - g(\sin \alpha + f \cos \alpha) \quad (4.8)$$

заменяя $f = tg\rho = \frac{\sin \rho}{\cos \rho}$, приводим это уравнение к виду

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta - \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)} \right] \quad (4.9)$$

Если направление относительной скорости частицы противоположно

рассмотренному, то в уравнении 4.1 знак "минус" перед силой нужно заменить на "плюс". В этом случае после преобразования аналогичного выполненным, придем к уравнению

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta + \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha - \rho)}{\cos(\beta + \rho)} \right] \quad (4.10)$$

Обобщая уравнения 4.9 и 4.10, представим их в следующем виде

$$\ddot{x} = a_{\pm} (\sin \delta - Z_{\pm}), \quad (4.11)$$

где $\delta = \omega t$

$$a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho} \quad (4.12)$$

$$Z_{\pm} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \rho)}{\cos(\beta \mp \rho)} \quad (4.13)$$

В равенствах 4.11, 4.12 и 4.13 верхние индексы у a и Z и верхние знаки перед ρ относятся к случаю положительного направления относительной скорости частицы ($x > 0$), а нижние к случаю отрицательного направления ($x < 0$).

В зависимости от величины переносной силы инерции P_u и угла β , характеризующего ориентацию ее линии действия, возможны четыре режима установившегося периодического относительного движения частицы по вибрирующей плоскости. Определяются они значениями безразмерных параметров Z_+ и Z_- . Области существования возможных режимов, совпадающие с областями устойчивости, их классификация представлены на рисунке 4.2.

На этой диаграмме область $|Z_{\pm}| > 1$ соответствует относительному покою частицы, т.к. в ней не выполняются одновременно условия начала скольжения в каждом из направлений

$$Z_- = -1 < \sin \delta < Z_+ = 1 \quad (4.14)$$

Качественные характеристики за один период регулярных режимов относительного движения следующие:

- режим 1 – двустороннее скольжение частицы с двумя паузами;
- режим 2 – двустороннее скольжение частицы без пауз (с двумя мгновенными остановками);
- режим 3 – двустороннее скольжение частицы с одной паузой и одной мгновенной остановкой;
- режим 4 – одностороннее скольжение с одной паузой.

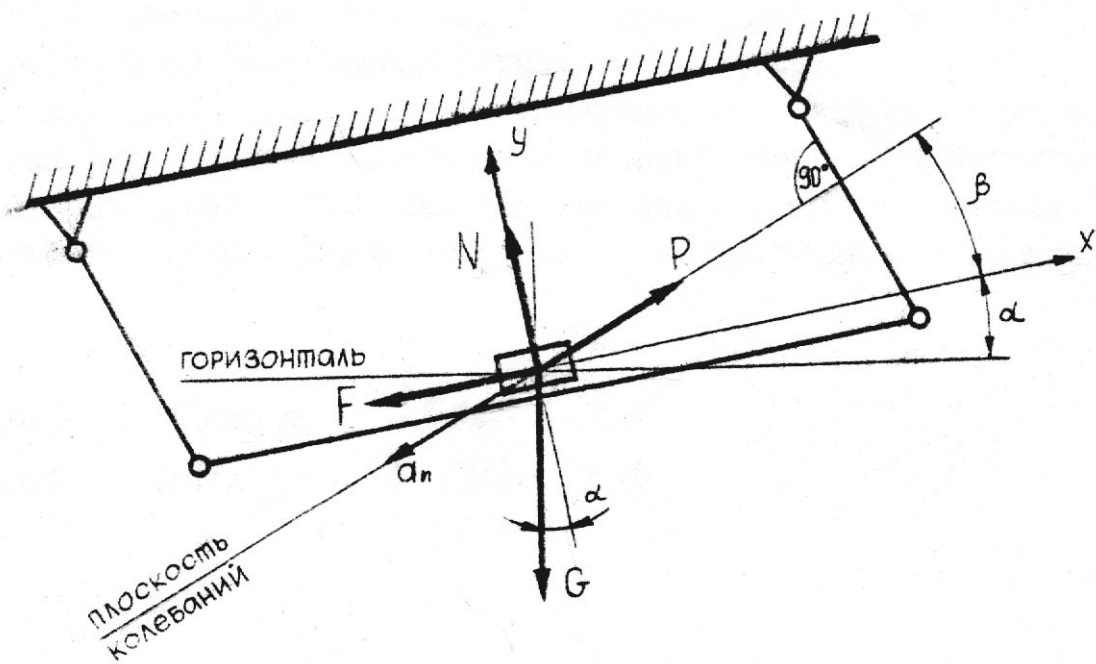


Рисунок 4.1 – Схема сил при вибрационном перемещении частицы в случае наклонных колебаний

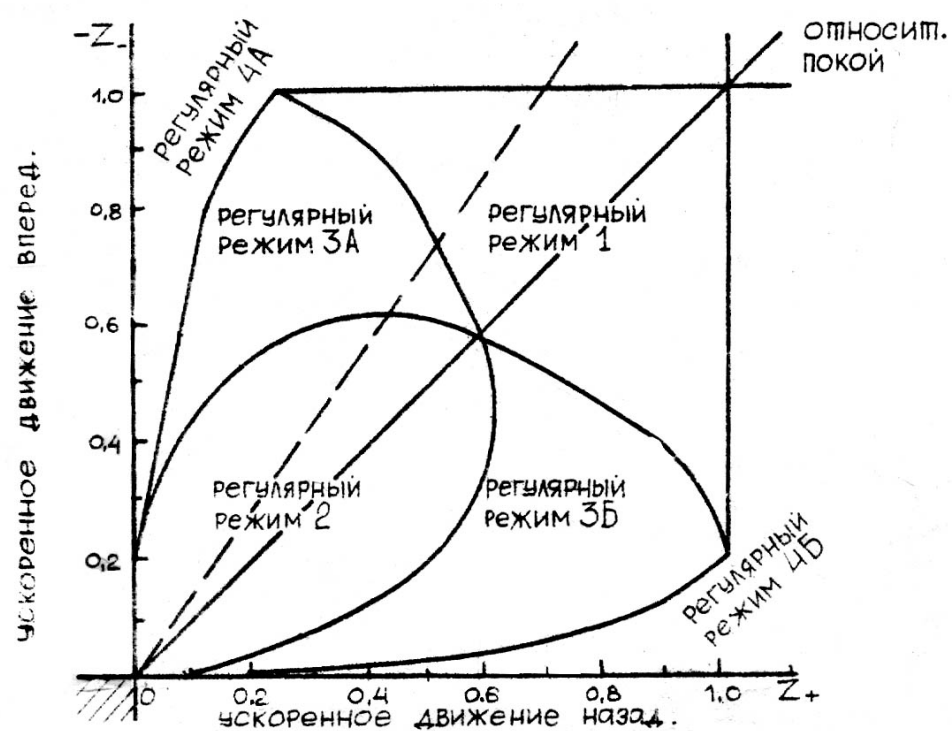
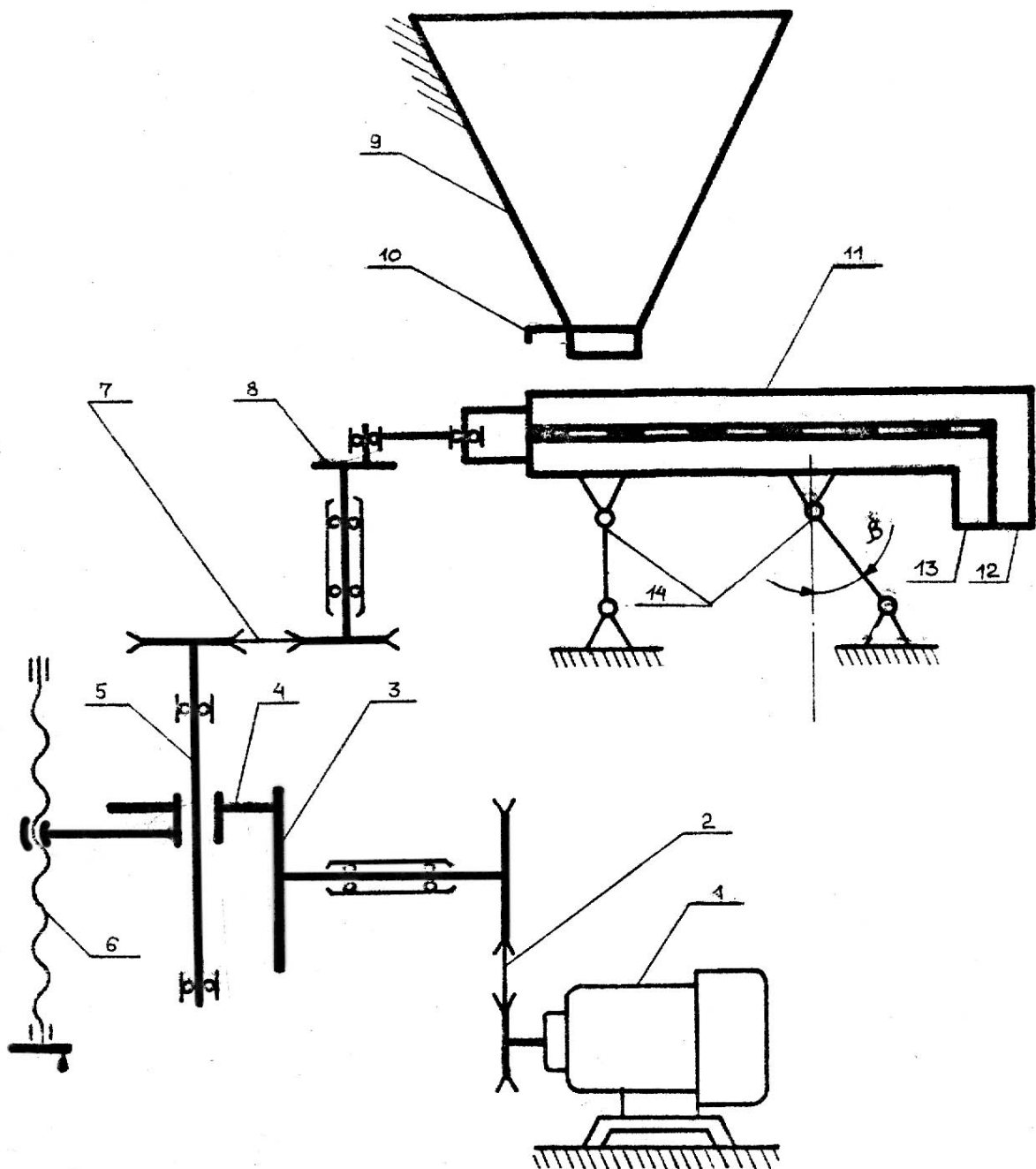


Рисунок 4.2 – Области существования режимов безотрывного движения частицы (по И.И. Блехману)

Все области существования режимов симметричны относительно биссектрисы координатного угла. Условие $|Z_+| < |Z_-|$ (область над биссектрисой) благоприятствует преимущественно скольжению в

положительном направлении, а условие $|Z_+| > |Z_-|$ (область биссектрисой) - в отрицательном направлении. Поэтому в режиме 3А мгновенная остановка происходит после положительного перемещения, а в режиме 3Б – после отрицательного перемещения. Единственное перемещение частицы за период колебаний в режиме 4А происходит в положительном направлении, а в режиме 4Б – в отрицательном.



1 – электродвигатель, 2,7 – клиноременная передача, 3 – лобовой вариатор, 4 – подвижный диск, 5 – промежуточный вал, 6 – регулировочный винт, 8 – эксцентриковый колебатель, 9 – бункер, 10 – заслонка, 11 – рабочий орган, 12, 13 – патрубки вывода сходовой и проходовой фракций, 14 – шарнирные опоры

Рисунок 4.3 – Кинематическая схема лабораторного устройства

Параметр, отражающий влияние углов α , β и ρ на вид режима и не зависящий от A и ω – это отношение

$$K = \frac{Z_-}{Z_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho) \cos(\beta - \rho)}{\cos(\beta + \rho) \sin(\alpha + \rho)} \quad (4.15)$$

На диаграмме И. И. Блехмана этот параметр можно представить как тангенс угла наклона к оси луча, выходящего из начала координат (на рисунке 4.2 показан пунктиром)

$$\operatorname{tg} \gamma = \left| \frac{Z_-}{Z_+} \right| = |K| \quad (4.16)$$

Все режимы, которые можно получить, варьируя амплитудным значением ускорения $A \omega^2$, не изменяя углов α , β и ρ , представлены точками этого луча.

Постепенно увеличивая $A \omega^2$, можно из области относительного покоя $Z_+ > 1$ перейти в область регулярного режима $4A(Z_+ < 1, Z_- > 1)$ затем в область регулярного режима 1 регулярного режима $3A$, и, наконец, получить режим 2 , характеризующийся двусторонним движением с двумя мгновенными остановками. Последний регулярный режим преобладает в сепарирующих машинах. Он позволяет наиболее полно использовать время пребывания сепарируемого материала на поверхности рабочего органа, т.к. просеивание происходит преимущественно при относительном движении.

Аналитическое решение дифференциального уравнения 4.11, с вводом ряда условий однозначности, позволяет получить формулу для определения средней скорости транспортирования при безотрывном двустороннем движении с двумя мгновенными остановками

$$v = A \cdot \omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon Z_+}{\sin \varepsilon} \right)^2} \left[\frac{2}{\pi} \operatorname{ftg} \beta \left(\operatorname{tg} \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right], \quad (4.17)$$

где

$$\varepsilon = \pi \frac{K}{K - 1} \quad (4.18)$$

Эффективность процесса сепарирования обычно оценивается следующими основными показателями:

- производительностью сепаратора, кг/с, Q ;
- коэффициентом извлечения частиц проходowego компонента в проходovou фракцию, %, η ;

При оценке производительности часто пользуются показателем удельной

подачи $q_в$ кг/(м.с), т.е. подачи на единицу ширины рабочего органа

$$q_в = \frac{Q}{B} = h \cdot \gamma \cdot v \quad (4.19)$$

или подачи на единицу площади рабочего органа

$$q_s = \frac{Q}{BL} = \frac{q_в}{L} = \frac{h\gamma v}{L} \quad (4.20)$$

где B - ширина рабочего органа, м;

h - толщина слоя сыпучего материала на рабочем органе, м;

γ - объемная масса исходной смеси, кг/м³;

v - средняя скорость перемещения материала по рабочему органу, м/с;

L - длина рабочего органа, м.

Коэффициент извлечения определяем по формуле

$$\eta = \frac{Q'_{np}}{Q'_{np} + Q'_{cx}} \cdot 100\% = \frac{Q'_{np}}{Q'} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

где Q'_{np} - масса частиц проходowego компонента, содержащихся в проходовой фракции, кг;

Q'_{cx} - масса частиц проходowego компонента, содержащихся в сходовой фракции, кг;

Q' - масса частиц проходowego компонента, содержащихся в исходной смеси, кг.

4.2 Содержание работы

Работа заключается в экспериментальном исследовании влияния кинематических параметров (частоты ω , амплитуды A колебаний рабочего органа, его угла наклона α и линии действия β переносной силы инерции) на среднюю скорость относительного движения частицы, сравнении экспериментальных данных с расчетными, определении влияния этих же параметров и нагрузки на эффективность процесса разделения зерновой смеси.

4.3 Оборудование

Лабораторная установка (рисунок 4.3), секундомер, делитель БИС-1, весы, лабораторный рассев-анализатор.

Лабораторная установка состоит из рамы, приводного механизма,

бункера рабочего органа.

От электродвигателя 1, через клиноременную передачу 2, вращение передается на лобовой вариатор, обеспечивающий плавную регулировку частоты колебаний рабочего органа 11, амплитуда колебаний регулируется эксцентриковым колебателем 8. Конструкция крепления шарнирных опор 14 позволяет изменить угол наклона рабочего органа и угол, характеризующий ориентацию линии действия добавочной силы. Из бункера 9 исходная смесь подается на рабочий орган, имеющий патрубки 12, 13 для вывода сходовой и проходовой фракций. Величина нагрузки регулируется заслонкой 10.

4.4 Порядок выполнения работы

4.4.1 Ознакомьтесь с конструкцией установки правилами эксплуатации и техники безопасности.

4.4.2 Получить задание у преподавателя и данные занести в таблицы.

Таблица 4.1 – Исходные и расчётные данные

№ опыта	№ повторности	ρ	$A, \text{ м}$	$\omega, \text{ с}^{-1}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\beta, \text{ рад}$	$L, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$v_{\text{экс}}, \text{ м/с}$	Z_+	Z_-	K	ε	$v_{\text{рас}}, \text{ м/с}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1													
	2													
	3													
	ср.													
...														
	1													
	2													
	3													
	ср.													

4.4.3 Установив требуемые кинематические параметры, включаем установку.

4.4.4 Помещаем на рабочий орган подопытную частицу и засекаем время ее относительного перемещения.

4.4.5 Полученные данные занести в таблицу 4.1, каждый опыт проводим не менее чем в трех повторностях.

4.4.6 Определяем экспериментальные и расчетные зависимости, строим графики и проводим их анализ.

4.4.7 При определении влияния кинематических и установочных параметров на эффективность процесса сепарирования данные заносим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные данные

№ опыта	A, м	$\omega, \text{с}^{-1}$	$A\omega^2, \text{м/с}^2$	$\alpha, \text{град}$	$\beta, \text{град}$	t, с	№ повторности	Сход		Проход		Q, кг/с	$q_v, \text{кг/(м}\cdot\text{с)}$	$\eta, \%$
								$Q_{сх}, \text{кг}$	$\dot{Q}_{сх}, \text{кг}$	$Q_{пр}, \text{кг}$	$\dot{Q}_{пр}, \text{кг}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1							1							
							2							
							3							
							ср							
...														
5							1							
							2							
							3							
							ср							

4.4.8 Установив параметры процесса, включаем установку и открываем заслонку бункера.

4.4.9 Через 5-10 с, после подачи продукта на рабочий орган, считаем режим установившимся и производим снятие баланса за время.

4.4.10 При снятии баланса сход и проход отсекаем одновременно. Нагрузку на рабочий орган определяем по материальному балансу.

4.4.11 Полученные фракции взвешиваем, на делителе БИС-1 выделяем навески и проводим их анализ.

4.4.12 Экспериментальные данные заносим в таблицу 4.2, проводим необходимые вычисления, строим графики зависимости и проводим их анализ.

Контрольные вопросы

1. Относительное, переносное и абсолютное движения.
2. Что такое сепарирование, цель и задачи процесса сепарирования?
3. Роль вибраций при механическом разделении сыпучих продуктов.
4. Основной параметр, от которого зависит эффективность процесса сепарирования.
5. Условие безотрывного движения частицы.
6. Режимы установившегося периодического относительного движения частицы без подбрасывания.
7. Параметр, отражающий влияние углов на вид режима относительного движения частицы без подбрасывания.
8. Каким способом можно заставить частицу перемещаться вверх по наклонной плоскости?
9. Основные показатели, характеризующие эффективность процесса сепарирования?

10. Устройство и принцип работы лабораторной установки.
11. Порядок проведения экспериментов

Список литературы

1. Гортинский В. В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин .- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 1980. - 304 с.
2. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна [Текст] : учеб. для вузов / под ред. А.Я. Соколова .- 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 1984. - 446 с.
3. Цециновский В. М. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий [Текст] : учеб. пособие для повышения квалификации руководящих работников и специалистов / В. М. Цециновский, Г. Е. Птушкина. - М.: Колос, 1976. - 368 с.

5 Лабораторная работа № 5

Определение физико-механических свойств сыпучих продуктов

Цель работы. Ознакомление с методами и приобретение навыков определения физико-механических свойств сыпучих продуктов.

5.1 Теоретические положения

Физико-механические свойства сыпучих продуктов оценивают большим количеством показателей, определяющих различные стороны этих свойств. Важное значение имеют геометрическая характеристика частиц, их плотность, состояние поверхности, упругость, магнитная восприимчивость и т. п.

Эти показатели существенно влияют на выбор конкретных режимов различных технологических процессов пищевых производств (измельчение, смешивание, прессование, сепарирование и т. п.)

Физико-механические свойства определяют по среднему образцу или навеске, выделенным из партии сыпучего продукта.

Партия – любое количество сыпучего продукта, предназначенного к одновременной приемке, сдаче, отгрузке или хранящегося в одном силосе, закроме, складе.

Выемка – небольшое количество сыпучего продукта, отобранного из партии за один прием для составления исходного образца.

Исходный образец – совокупность выемок, отобранных из партии за один прием для составления исходного образца.

Средний образец – часть исходного образца. Для небольших партий сыпучих продуктов исходный образец одновременно является и средним образцом.

Навеска – часть среднего образца, выделенная для определения физико-механических свойств сыпучего продукта.

5.1.1 Порядок отбора выемок

Выемки сыпучего продукта отбирают щупами разных систем, которые делятся на конусные, цилиндрические, мешочные, пневматические и механические.

Выемки сыпучего продукта из автомобилей отбирают щупом в четырех точках кузова с поверхности и дна или по всей глубине насыпи на расстоянии 0,5 метра от бортов, общий вес выемок не менее 1 кг. Выемки сыпучего продукта из двухосных вагонов отбирают щупом в пяти точках поверхности насыпи в четырех углах вагонов на расстоянии примерно 50-75 см от стенок и в середине вагона. Из четырехосного вагона выемки отбирают в одиннадцати точках поверхности насыпи. В каждой точке выемки выбирают из трех слоев

насыпи: из верхнего на глубине до 10 см, среднего на глубине, равной примерно половине насыпи, и нижнего – у пола вагона. Общий вес выемок при загрузке двухосного вагона должен быть около 2 кг, а четырехосного – около 4 кг.

В складах при высоте насыпи до 1,5 м выемки отбирают вагонным щупом, при большей высоте – щупом с навинчивающимися штангами. Перед отбором выемок поверхности сыпучего продукта в складе разделяют на секции площадью до 100 м² каждая. В каждой секции выемки отбирают в пяти точках поверхности насыпи в четырех углах на расстоянии примерно 1 м от границ секции и посередине насыпи. В каждой из пяти точек выемки отбирают из верхнего слоя на глубине 10-15 см от поверхности насыпи, из среднего слоя и из нижнего слоя (на уровне пола). Общий вес выемок должен составлять около 2 кг на каждую секцию площадью 100 м².

Выемки из силосов элеватора и закромов отбирают при выпуске сыпучего продукта металлическим специальным ковшом путем пересечения струи зерна через равные промежутки времени, но с таким расчетом, чтобы общий вес отобранных выемок составлял не менее 0,1 кг на каждую тонну перемешиваемого зерна.

Выемки из тары отбирают щупом из расшитых мешков в трех местах вверху, в середине и внизу. Из зашитых мешков выемки отбирают из одного угла мешочным щупом. Щуп вводят по направлению средней части мешка снизу вверх желобком вниз, затем поворачивают его на 180° и вынимают. Количество мешков, из которых должны быть отобраны выемки, определяют в зависимости от величины партии. Установлено, что чем больше из партии изымается выемок, тем точнее можно дать характеристику сыпучего продукта по качеству.

Таблица 5.1

Количество мешков в партии	Количество мешков, из которых производят выемки
До 10 включительно	Из каждого второго мешка
От 10 до 100	Из 5 мешков + 5% от количества мешков в партии
Свыше 100	Из 10 мешков + 5% от количества мешков в партии

5.1.2 Составление исходного и среднего образца, выделение навесок

Исходный образец весом до 2 кг одновременно является и средним образцом. Если же вес исходного образца превышает 2 кг, то из него выделяют средний образец весом около 2 кг. Основное условие для получения среднего образца – тщательное смешивание исходного образца. Применяют два способа смешивания: ручной и механический.

Ручной способ состоит в том, что исходный образец высыпают на гладкую поверхность, разравнивают продукт в виде квадрата и смешивают, одновременно сгребая его в валик двумя короткими деревянными планками со

скошенным ребром. Смешивают так, чтобы частицы, захваченные с противоположных сторон квадрата правой и левой руками, ссыпались в середину одновременно, образуя после нескольких перемешиваний валик, затем берут продукт с концов валика и одновременно ссыпают с обеих планок в середину. Так перемешивают три раза. Затем исходный образец снова разравнивают на четыре треугольника. Из двух противоположных треугольников продукт удаляют, а два оставшихся вновь перемешивают и делят на четыре треугольника. Из двух противоположных треугольников продукт удаляют, а два оставшихся вновь перемешивают и делят на четыре треугольника. И так делят до сих пор, пока в двух треугольниках не получат примерно 2 кг продукта, которые и будут составлять средний образец.

При выделении вручную навесок смешивание и деление образца производят до тех пор, пока количество продукта в двух оставшихся треугольниках не будет несколько превышать установленное количество. Для механизированного перемешивания сыпучего продукта и выделения среднего образца и навесок служат различные делительные устройства.

Делительный аппарат БИС-1 (рисунок 5.1) дает возможность примерно в течение 30 секунд смешать продукт, выделить параллельно одну - две навески требуемого объема и отделить половину образца для определения натурального веса. Смешивают продукт и выделяют навески в аппарате БИС-1 на трех конусах и трех воронках, соединенных парами. Два верхних конуса имеют делительные устройства, разделяющие образец пополам, и третий нижний конус имеет две подвижные делительные ячейки, позволяющие выделять по цифровой шкале требуемые навески. Верхняя часть прибора состоит из воронки вместимостью до 4 кг продукта, нижняя часть которого снабжена затвором. Сыпучий продукт поступает из воронки на первый конус, распределяется на нем тонким слоем, встречая на своем пути улавливающие ячейки делительного устройства, разделяется пополам и по двум параллельно расположенным воронкам попадает на второй конус. На втором конусе, образец также смешивается и делится пополам. Выделенную половину по специальному отводу удаляют из делительного устройства и её можно использовать для определения ее натурального веса. Оставшаяся часть смешивается, поступает в воронку, имеющую две подвижные делительные ячейки. Перемещением подвижных ячеек регулируется величина необходимых навесок для анализа.

5.2 Содержание работы

5.2.1 Теоретические положения

Натурной массой называют массу 1 л сыпучего продукта, выраженную в граммах. На величину натурности в состоянии свободного уплотнения влияют форма, характер поверхности, влажность продукта, его выравненность и температура, характер и количество примесей. Частицы округлой формы или с гладкой поверхностью укладываются плотнее, чем удлиненные или с шероховатой (морщинистой) поверхностью. При повышении влажности

сыпучего продукта натура уменьшается. Органические примеси уменьшают натуру, а минеральные увеличивают. Чем выше плотность частиц, тем больше натура.



Рисунок 5.1 – Делитель БИС-1

На хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятиях по натурной массе судят о полновесности зерна и его товарных качествах. Чем выше натура, тем меньше в зерне содержится оболочек и больше эндосперма, следовательно, тем лучше мукомольные свойства зерна. Натурную массу определяют на литровой пурке с падающим грузом или по 20 литровой пурке по ГОСТ 7861-74.

5.2.2 Содержание работы

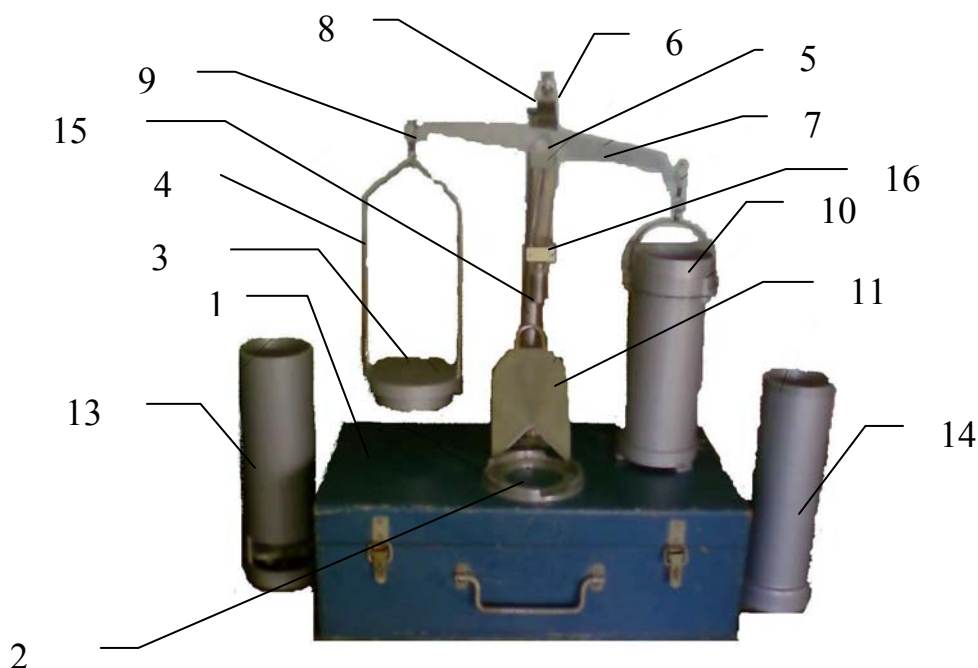
Работа заключается в приобретении навыков выделения образца и навесок, определении натурной массы различных сыпучих продуктов.

5.3 Оборудование

Весы, делительный аппарат БИС-1, литровая пурка.

Литровая пурка состоит из следующих основных узлов футляр 1 служит основанием при сборке пурки для работы и укладочным ящиком для нее. На крышке футляра укреплены цоколь для установки колонки 15 и башмак 2 для закрепления на нем мерки 10. Колонка 15 полая, в ее верхний конец вставляется кронштейн 8 со своим цилиндрическим концом, а на нижний конец накручена контргайка. Опора коромысла представляет собой стойку, на которой смонтированы вилка с двумя подушками и щекой, кронштейн со шкалой 16 и груз. В средней части коромысла 7 укреплены опорная призма и стрелка. На концах коромысла закреплены грузоприемные призмы. На призмы навешивают серьги. На крючки серег навешивается подвеска 4 и мерка 10. В чашке 3

имеется подгоночная полость. Мерка 10 представляет собой цилиндрический стакан, имеющий в центре два отверстия, а по окружности – три выступа-ножки, с помощью которых мерка прочно закрепляется в башмаке 2. В верхней части мерки имеется щель для ножа. Падающий груз выполнен в виде цилиндра с кольцевой выточкой. Стальной нож 11 имеет на внешней плоскости окружность, равную окружности мерки, и вырез в виде прямого угла. Если падающий груз находится на дне мерки, то объем мерки между верхней плоскостью груза и нижней плоскостью ножа равен строго одному литру. Наполнитель 14 выполнен в виде полого цилиндра, один конец которого имеет утолщение и большой внутренний диаметр. Это позволяет плотно устанавливать наполнитель в мерку. Цилиндр насыпки 13 имеет на одном конце вырезанное окно. Здесь внутри цилиндра смонтирована воронка с заслонкой и замком 15.



1 - футляр, 2 - башмак, 3 - чашка, 4 - подвеска, 5 - кронштейн, 6 - опора, 7 - коромысло, 8 - кронштейн, 9 - серьга, 10 - мерка, 11 - нож стальной, 12 - груз падающий, 13 - цилиндр насыпки, 14 - наполнитель, 15 - колонка, 16 - шкала.

Рисунок 5.2 – Литровая пурка

5.4 Порядок выполнения работы

5.4.1 Средний образец высыпаем в воронку делительного аппарата и выделяем образец для определения натурной массы и навеску определенной массы.

5.4.2 Сборку пурки производим на ровном, горизонтальном столе.

5.4.3 Устанавливаем футляр на столе так, чтобы он не имел качания и был обращен ручкой и замком к работающему.

5.4.5 Колонку резьбовым концом вворачиваем до отказа в цоколь на крышке футляра и закрепляем контргайкой.

5.4.6 На кронштейн колонки подвешиваем опору 6 коромысла и осторожно, чтобы не повредить опорную призму и стрелку, ставим на место коромысло, которое должно лечь опорной призмой на площадку опоры 6.

5.4.7 Надеваем серьги на концевые грузоприемные призмы коромысла, руководствуясь цифровыми обозначениями на серьгах и коромыслах.

5.4.8 Снимаем мерку с коромысла и извлекаем из нее падающий груз. Закрепляем мерку в башмаке 2 на крышке футляра так, чтобы гравировка «1 литр» была обращена к работающему.

5.4.9 В щель мерки, закрепленной в башмаке крышки футляра, вдвигаем нож так, чтобы окружность на верхней плоскости ножа совпала с окружностью мерки. На нож кладем падающий груз (вверх плоскостью с заводским номером). На мерку надеваем наполнитель 14, а на него - цилиндр насыпки 13, заполненный зерном.

5.4.10 Осторожным нажатием пальца на рычажок замка 13 открываем заслонку воронки, и зерно из цилиндра пересыпается в наполнитель. Быстро вынимаем нож из мерки, но так, чтобы не произошло сотрясение мерки. После того как падающий груз, а вместе с ним и зерно упадут в мерку, нож снова вдвигаем в щель, но теперь до упора ручкой ножа в стенку мерки. При этом зерна, лежащие на пути лезвия ножа, перерезаются.

5.4.11 Снимаем цилиндр насыпки с наполнителя и закрываем отверстие воронки заслонкой. Снимаем мерку вместе с наполнителем с башмака, и слегка придерживаем пальцем нож, высыпая оставшееся в наполнителе зерно. Снимаем наполнитель с мерки и удаляем оставшееся на ноже зерно. Вынимаем нож из щели мерки.

5.4.12 Мерку подвешиваем к правому плечу коромысла и при помощи комплекта гирь взвешиваем зерно с точностью 0,5 г. По окончании работы разбираем пурку, все ее составные протираем чистой мягкой тканью и укладываем на свои места в футляр.

Контрольные вопросы

1. Основные понятия и определения.
2. Порядок отбора выемок.
3. Составление исходного и среднего образца, выделение навесок.
4. Устройство и принцип работы делительного аппарата БИС-1.
5. Устройство литровой пурки и порядок работы на ней.

Список литературы

1. Авдусь П.Б. Определение качества зерна, муки и крупы [Текст] / П.Б. Авдусь, А.С. Сапожникова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Колос, 1976. - 336 с
2. Бутковский В.А. Технологическое оборудование мукомольного производства [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.А. Бутковский, Г.Е. Птушкина. - М. : ГП `Журнал Хлебопродукты`, 1999. - 208 с.

6 Лабораторная работа № 6

Исследование процесса перемешивания в аппаратах с вращающимися мешалками

Цель работы. Ознакомление с основными конструктивными типами мешалок, определения влияния различных факторов на изменение мощности, потребляемой при перемешивании.

6.1 Теоретические положения

Перемешивание – процесс многократного перемещения частиц неоднородной текучей среды друг относительно друга во всем объеме аппарата, протекающий за счет импульса, передаваемого среде механической мешалкой, струей жидкости или газа.

Перемешивание – обязательное условие успешного проведения многих самых разнообразных технологических операций. На производстве перемешивание проводят в целях:

а) обеспечения равномерного распределения и дробления до заданной дисперсности газа в жидкости и жидкости в жидкости, а также равномерного распределения твердых частиц в объеме жидкости;

б) интенсификации нагрева или охлаждения обрабатываемых масс, а также обеспечения равномерного распределения температуры в перемешиваемом объеме;

в) интенсификации массообмена в перемешиваемой среде, а также равномерного распределения растворенного вещества в перемешиваемой массе.

В зависимости от целей и условий проведения процесса применяют аппараты с перемешивающими устройствами различных конструкций. Наиболее распространены в настоящее время аппараты с вращающимися механическими мешалками разных типов. При перемешивании такими мешалками возникает сложное трехмерное течение жидкости. Первичными в этом течении является тангенциальное движение, которое в пространстве, ограниченном дном и стенками аппарата и свободной поверхностью жидкости, вызывает радиальные и аксиальные потоки. Область применения наиболее распространенных типов механических перемешивающих устройств рассмотрены в таблице 6.1.

Конструктивные параметры мешалок диаметр, высота, число лопастей определяются вязкостью жидкости, объемом аппарата.

Лопастные мешалки при перемешивании жидкостей с динамической вязкостью $\mu < 1$ Па·с и высотой сосуда $H < 1,5D$ должны иметь диаметр и высоту лопасти соответственно

$$d_m = (0,6...0,7) \cdot D, \quad (6.1)$$

$$B = (0,1...0,2) \cdot D \quad (6.2)$$

где D – диаметр сосуда, м.

В листовых мешалках делают отверстия, которые способствуют образованию в жидкости струй, ускоряющих процесс перемешивания.

Диаметр и высота лопасти могут приниматься равными

$$d_m = (0,3...0,5) \cdot D, \quad (6.3)$$

$$B = (0,5...1,0) \cdot D \quad (6.4)$$

Гребенчатые перемешивающие устройства состоят из вертикальных и горизонтальных лопастей. Диаметр и высоту мешалки принимают равными

$$d_m = (0,87...0,98) \cdot D, \quad (6.5)$$

$$h = (0,8...0,9) \cdot D \quad (6.6)$$

Якорные мешалки – это лопастные или рамные, нижняя часть которых выполнена по форме сечения сосуда. Диаметр и высота, а также ширина мешалки принимают соответственно.

Пропеллерные мешалки бывают двух-, трех- и четырехлопастные. Большинство применяемых мешалок – трехлопастные. Диаметр пропеллера принимается в 3-4 раза меньше, чем диаметр сосуда. Турбинные мешалки напоминают собой рабочее колесо водяной турбины с лопатками. Такие мешалки могут иметь одно или несколько рабочих колес. Число лопаток рабочего колеса колеблется от 4 до 16.

Основными параметрами механических перемешивающих устройств являются частота вращения мешалки и мощность. Первый показатель определяет скорости потоков жидкости в аппарате, а значит и интенсивность процесса. С увеличением частоты вращения для большинства технологических процессов интенсивность перемешивания возрастает, но только до определенных значений. При высоких частотах может произойти ухудшение эффекта перемешивания.

Частота вращения мешалки для суспензирования определяется

$$n = C_2 \frac{D_c^{0,5} \cdot d_r^{0,5} \cdot D^{x_1}}{c^{0,5} \cdot d_M^{y_1}}, \quad c^{-1} \quad (6.7)$$

где C_2 , x_1 , y_1 - числовые коэффициенты, определяемые в зависимости от типа мешалки и вида технологического процесса по экспериментальным таблицам,

Dc - разность плотностей тяжелой и легкой фазы, $кг / м^3$,

d_r - диаметр частиц, м,

ρ - плотность жидкости, $кг/м^3$,

d_M - диаметр мешалки, м,

D - диаметр аппарата, м.

Для процессов эмульгирования

$$n = C_4 \frac{Dc^{0,315} \cdot \sigma^{0,185} \cdot D^{x_2}}{c^{0,5} \cdot d_M^{y_2}}, \quad c^{-1}, \quad (6.8)$$

где C_4 , x_2 , y_2 – числовые экспериментальные коэффициенты,

σ – межфазовое натяжение на границе раздела двух фаз, $Н/м^2$.

Для процесса гомогенизации

$$n = \frac{c}{\tau}, \quad c^{-1}, \quad (6.9)$$

где c – числовой экспериментальный коэффициент,

τ – продолжительность процесса гомогенизации, с.

Мощность, потребляемая на перемешивание, определяется диаметром мешалки, ее типом, плотностью и динамической вязкостью жидкости, частотой вращения, величиной уровня жидкости в аппарате и т. д. Определение мощности на перемешивание производится по формуле

$$N_N = K_N \cdot c \cdot n^3 d_M^5, \quad Вт \quad (6.10)$$

где K_N – критерий мощности.

Для каждого типа перемешивающего устройства K_N определяется в зависимости от величины центробежного критерия Рейнольдса и отношения

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_M} \quad (6.11)$$

Центробежный критерий Рейнольдса можно определить

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d_M^2}{\mu}, \quad (6.12)$$

где ρ – плотность жидкости. Для воды $\rho = 1000$ $кг/м^3$,

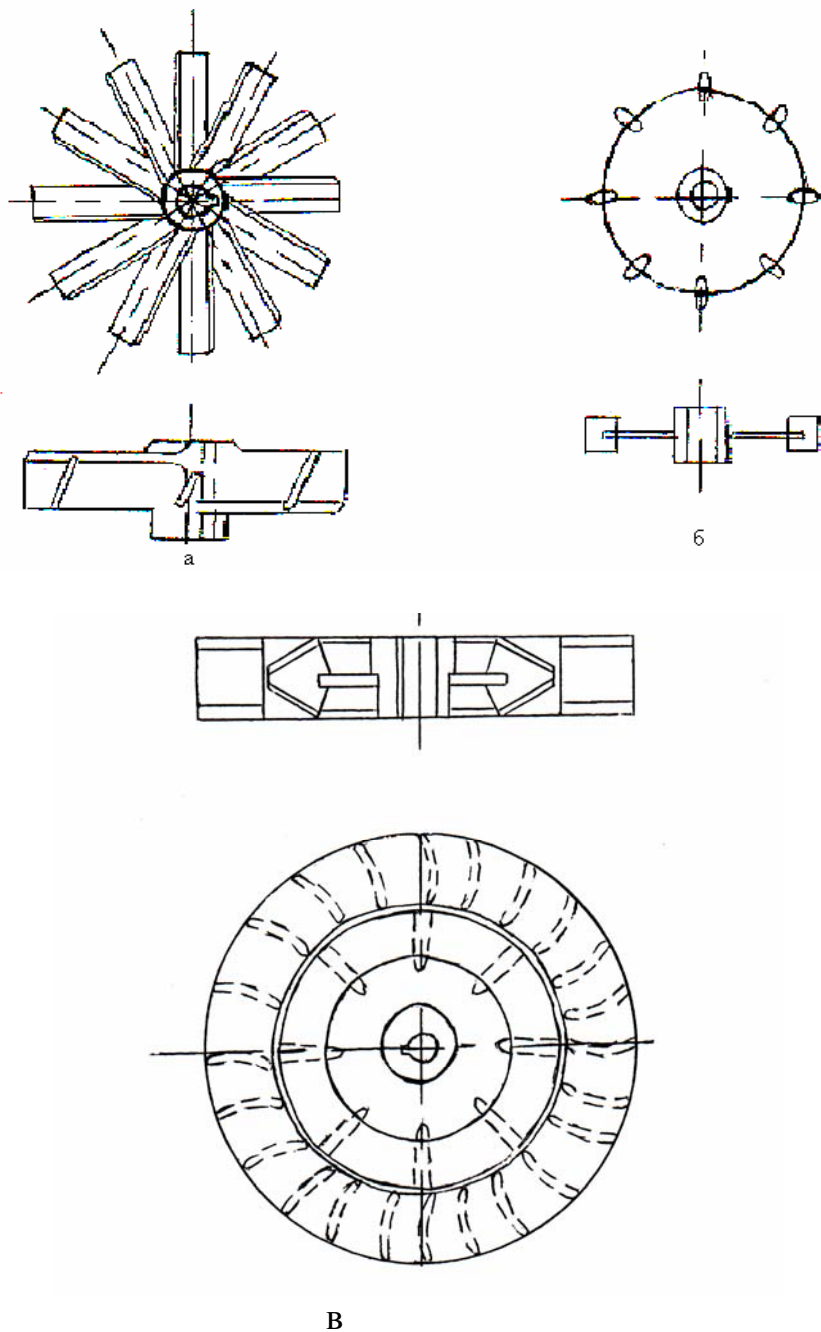
μ – динамическая вязкость. Для воды $\mu = 10^{-3}$ $Па \cdot с$.

Таблица 6.1 – Область применения мешалок

Тип мешалки	Область применения	Вязкость μ , Па*с	Скорость ν , м/с
1	2	3	4
Лопастные	Перемешивание взаиморастворимых жидкостей, грубое эмульгирование, взвешивание твердых частиц в жидкости при соотношении твердого вещества в жидкости менее 90%, взвешивание волокнистых веществ, взмучивание легких осадков, медленное растворение кристаллических или аморфных, а также волокнистых веществ, выравнивание температуры, перемешивание в процессах кристаллизации.	До 1	1,5-5
Листовые	Растворение жидкостей малой вязкости, взвешивание твердого вещества, растворение кристаллических веществ, интенсификация теплообмена.	До 1	0,5-5
Якорные или рамные	Перемешивание вязких и тяжелых жидкостей, интенсификация теплообмена, предотвращения выпадения осадка на стенках и дне сосуда, суспензирование в вязких средах.	До 5	0,5-6
Турбинные закрытого типа	Растворение и эмульгирование жидкостей, существенно отличающихся по плотности, перемешивание кристаллических или аморфных твердых частиц с массовым содержанием до 80%, взвешиванием волокнистых частиц с массовым содержанием до 6%, интенсификация теплообмена.	До 800	2,5-15

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4
Турбинные открытого типа	Растворение и эмульгирование жидкостей, взвешивание аморфных или кристаллических твердых частиц с массовым содержанием до 80%, взвешиванием волокнистых частиц с массовым содержанием до 5%, взмучивание при массовом содержании частиц до 1,5 мм, выравнивание температуры, перемешивание неньютоновских жидкостей	До 400	2,5-10
Пропеллерные, пропеллерные с направляющей трубой.	Растворение и эмульгирование взвешиванием при массовом содержании твердого вещества до 50%, взмучивание с массовым содержанием твердого вещества до 10% и размером частиц до 0,1 мм, перемешивание волокнистых материалов, выравнивание температуры, интенсификация теплообмена.	До 2	3,8-16



а, б – открытого типа,
 в – закрытого типа с направляющим аппаратом.
 Рисунок 6.1 – Турбинные мешалки

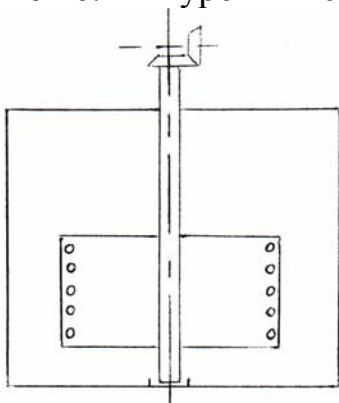


Рисунок 6.2 - Листовая мешалка

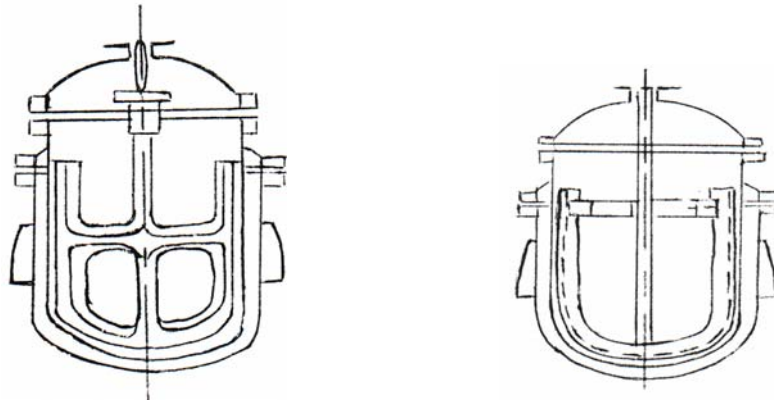


Рисунок 6.3 – Якорная и рамная мешалка

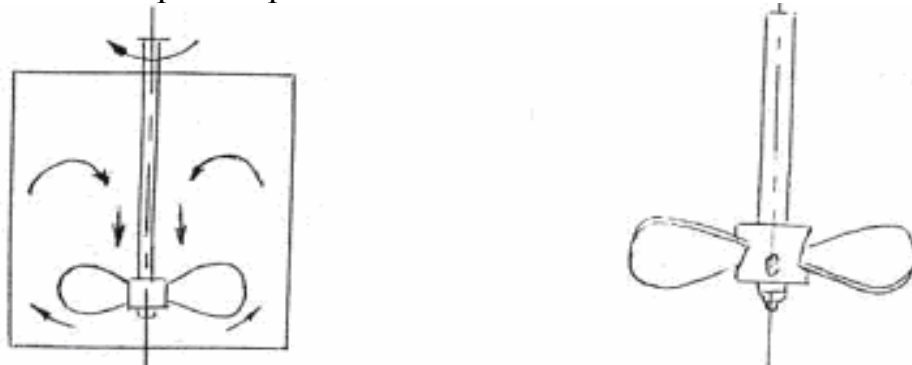
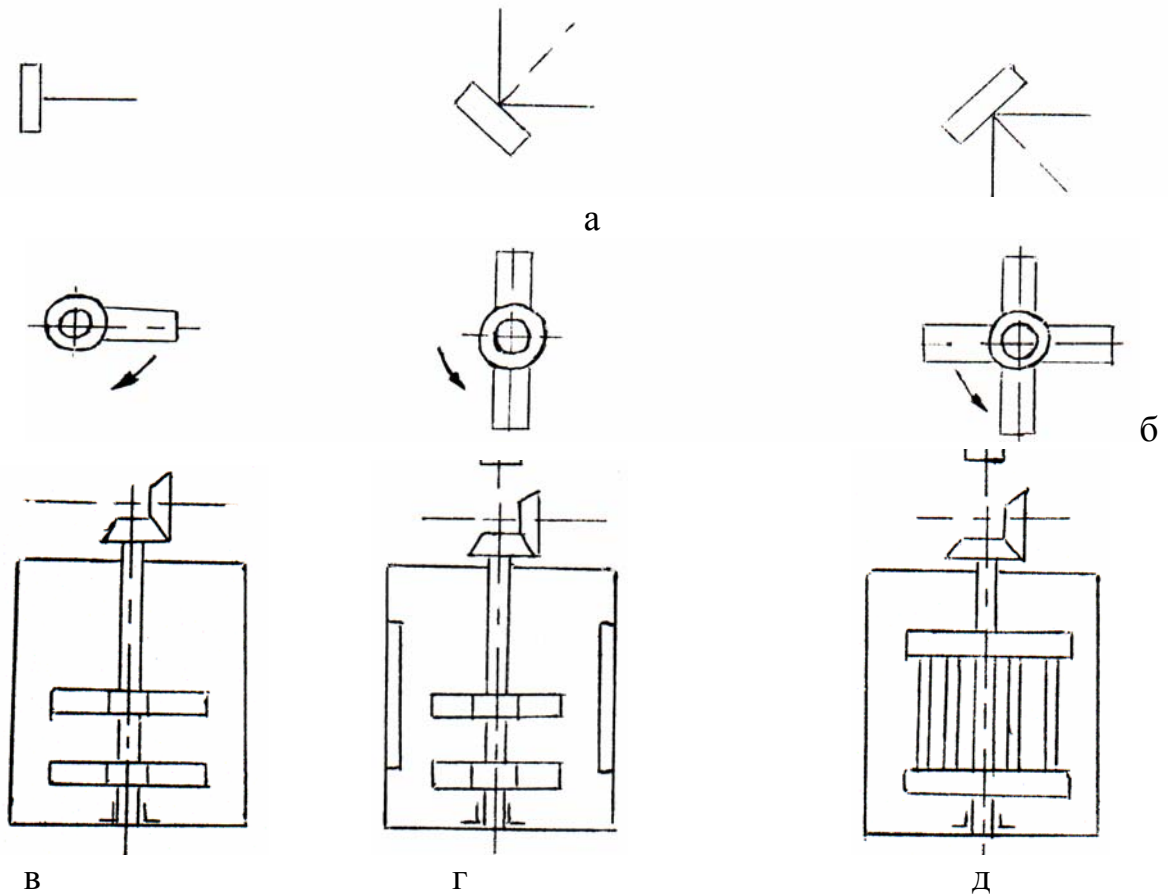


Рисунок 6.4 - Пропеллерная мешалка



а - различный наклон лопастей, б - устройство лопастей, в - парные лопасти, г - мешалки с отражателями, д - решетчатая мешалка.

Рисунок 6.5 – Лопастные мешалки

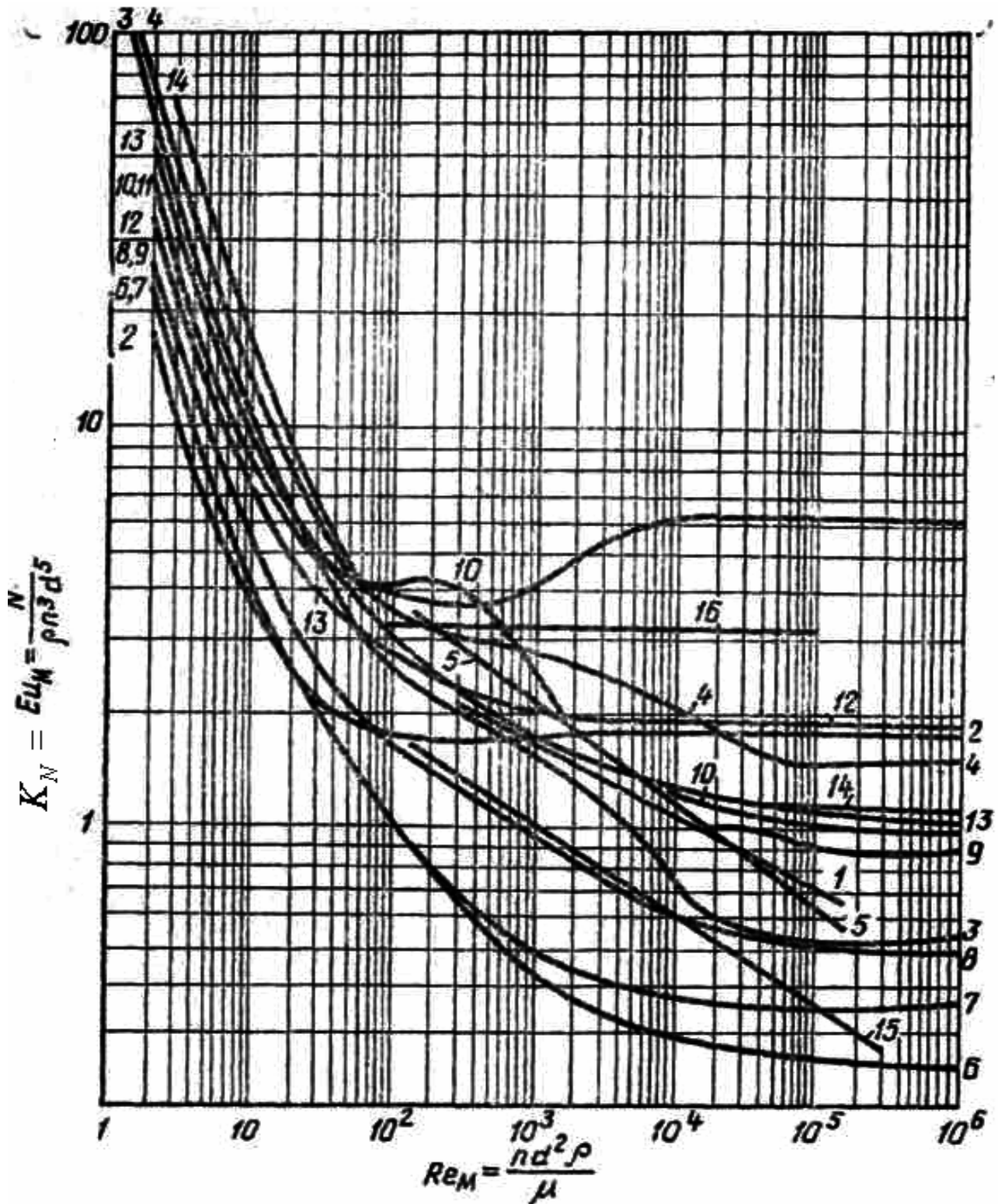


Рисунок 6.6 – Зависимость $Eu_M(K_N)$ от Re_M для различных типов мешалок.

Таблица 6.2 – Характеристики мешалок (к рисунку 6.6)

№ кривой	Тип мешалки	Основные размеры мешалки				Характеристика сосуда
		D/d	h/D	b/d	s/d	
1	Двухлопастная	3	1	0,25	-	Без перегородок
2	»	3	1	0,167	-	С 4 перегородками шириной 0,1D
3	»	2	1	0,885	-	Без перегородок
4	»	2	1	0,885	-	Со змеевиком $d_{зм} = 1,9d$; $d_{тр} = 0,066d$; $t = 0,12d$
5	Шестилопастная	1,11	1	0,066	-	Без перегородок
6	Пропеллерная	3	1	-	1	»
7	»	3	1	-	1	С 4 перегородками шириной 0,1D
8	»	3	1	-	2	Без перегородок
9	»	3	1	-	2	С 4 перегородками шириной 0,1D
10	Открытая турбинная с 6 лопатками	3	l/d=0,25	0,2	-	Без перегородок
11	То же	3	1	0,2	-	С 4 перегородками шириной 0,1D
12	Открытая турбинная с 8 плоскими наклонными лопатками	3	1	0,125	-	То же
13	Закрытая турбинная с 6 лопатками	3	1	-	-	Без перегородок
14	Закрытая турбинная с 6 лопатками и направляющим аппаратом с 20 лопатками				-	»
15	Якорная	1,11	1	0,066	-	»
16	Дисковая с 6 лопатками	2,5	1	0,1	-	С 4 перегородками шириной 0,1D

Общая мощность, потребляемая перемешивающим устройством

$$N = \frac{K_n \cdot (N_n - N_c)}{\eta}, \quad (6.13)$$

где N_c – мощность, затрачиваемая на преодоление сил вредных сопротивлений трения на подшипниках уплотнения, Вт, $N_c = 0,05$ Вт;

K_n – коэффициент, учитывающий особенности пуска электродвигателя, равный 1,13;

η – К.П.Д., $\eta = 0,9$.

6.2 Содержание работы

Работа заключается в выявлении с помощью установки, имитирующей устройство для механического перемешивания жидких пищевых продуктов, основных зависимостей, определяющих технологический процесс.

В процессе работы необходимо определить для каждого типа мешалок:

1. Мощность N_e , затрачиваемую на преодоление вредных сопротивлений – мощность холостого хода.

2. Мощность на перемешивание N_n

$$N_n = N_{\text{э}} - N_e, \quad (6.14)$$

где $N_{\text{э}}$ – мощность, замеренная экспериментально, при перемешивании жидкости.

3. Расчетную мощность на перемешивание N_N по формуле (6.10) и сравнить с данными эксперимента (т.е. с N_n).

4. Зависимость мощности на перемешивание от плотности перемешиваемой жидкости:

$$N_n = f(\rho). \quad (6.15)$$

5. Зависимость мощности на перемешивание от частоты вращения мешалки

$$N_n = f(n). \quad (6.16)$$

6. Зависимость мощности на перемешивание от высоты жидкости в аппарате

$$N_n = f(H). \quad (6.17)$$

Перед началом эксперимента необходимо выполнить его планирование, определив для каждого исследования число необходимых опытов, интервал между независимыми параметрами, вид последовательности. После получения массива экспериментальных данных провести их статистическую обработку, проверить на точность полученные данные, определить дисперсию, коэффициент корреляции, коэффициенты уравнения регрессии. Используя один из методов, построить графики полученных зависимостей.

6.3 Оборудование

Экспериментальная установка для исследования механических перемешивающих устройств состоит из сосуда 1, вертикального вала 2, мешалки 3. Привод мешалки осуществляется электродвигателем 4. Соединение валов двигателя и мешалки обеспечивается резьбой со стопорным штифтом. Для имитации перемешивания жидкостей с различной плотностью служит ленточный тормоз 5. Ввод тормоза в действие обеспечивается винтовым механизмом 6. Положение винта тормоза определяется по диску 7 с градусной шкалой, закрепленного на направляющей опорной рамке. Цена деления диска 10 градусов. Частота вращения вала мешалки может плавно изменяться с помощью автотрансформатора 8. Для измерения мощности, потребляемой перемешивающим устройством, установка снабжена амперметром и вольтметром. Установка имеет общее основание 10, на котором расположен пульт управления 11. В комплект мешалок, выполненных из нержавеющей стали входят лопастная, листовая, якорная, пропеллерная, рамная, турбинная открытого типа.

6.4 Порядок выполнения работы

6.4.1 Ознакомиться с конструкцией установки, правилами эксплуатации.

6.4.2 Произвести планирование эксперимента по следующему алгоритму:

а) установить интервал (максимальные и минимальные) изменения и независимых переменных;

б) определить необходимое число опытов;

в) задаться величиной интервала между независимыми переменными;

г) установить порядок эксперимента;

д) подготовить экспериментальные таблицы.

6.4.3 Не заливая в сосуд установки жидкость, снять крышку и закрепить на валу электродвигателя мешалку (тип мешалки определяется в соответствии с планом эксперимента), замерив предварительно ее диаметр.

6.4.4 При максимальной частоте вращения замерить мощность холостого хода, данные занести в таблицу 6.3.

6.4.5 Опыт повторить для всех мешалок.

6.4.6 Залить жидкость в сосуд, установить в мешалку, замерить мощность при максимальной частоте вращения мешалки.

Таблица 6.3 – Мощность холостого хода

№ опыта	Тип мешалки и её диаметр	Мощность холостого хода, N_e , Вт

6.4.7 Опыт повторить для всех типов мешалок. По формуле 6.14 определить мощность на перемешивание N_n . Данные занести в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Зависимость мощности на перемешивание от типа мешалки

№ опыта	Тип мешалки	Экспериментальное значение мощности, $N_э$, Вт	Мощность на перемешивание, N_n , Вт

6.4.8 Ступенчато изменяя частоту вращения, замерить мощность. Данные занести в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Зависимость мощности на перемешивание от частоты вращения

№ опыта	Частота вращения	Экспериментальное значение мощности, $N_э$, Вт	Мощность на перемешивание, N_n , Вт

6.4.9 Опыт по пункту 4.8 повторить для всех типов мешалок (по выбору).

6.4.10 Установить мешалку (тип определяется по указанию преподавателя). При максимальной частоте вращения вала с мешалкой увеличить плотность жидкости на 200 кг/м^3 , замерив, мощность, данные занести в таблицу 6.6.

Таблица 6.6 – Зависимость мощности на перемешивание от плотности жидкости

№ опыта	Тип мешалки	Плотность жидкости	Экспериментальное значение мощности, $N_э$, Вт	Мощность на перемешивание, N_n , Вт

6.4.11 Установив мешалку (по выбору), ступенчато изменяя уровень жидкости в сосуде, замерить мощность, данные занести в таблицу 6.7.

Таблица 6.7 – Зависимость мощности на перемешивание от уровня жидкости

№ опыта	Тип мешалки	Уровень жидкости	Экспериментальное значение мощности, $N_э$, Вт	Мощность на перемешивание, N_n , Вт.

6.5 Оформление работы

По результатам работы каждый студент оформляет отчет в соответствии с требованиями, предъявляемыми при оформлении курсовых и дипломных работ. Отчет должен содержать схему установки с кратким ее описанием, экспериментальные таблицы, все необходимые вычисления, проведенные при статистической обработке.

Контрольные вопросы

1. Промышленное значение процесса перемешивания
2. Какая физическая величина обозначена в формулах
3. Назначение отверстий в лопастях листовых мешалок
4. В каком отношении находятся диаметр якорной мешалки и диаметр сосуда
5. До какого процента массового содержания волокнистых веществ может быть использована турбинная мешалка открытого типа в случае процесса взвешивания.
6. Особенности течения жидкости при перемешивании вращающимися механическими мешалками.
7. Понятия об интенсивности и эффективности перемешивания.
8. Какими физическими величинами определяется коэффициент мощности?
9. В каком состоянии находится диаметр пропеллерной мешалки и диаметр сосуда?
10. Указать последовательность исследования зависимости $N_n = f(H_0)$.
11. Указать, какие типы механических перемешивающих устройств можно использовать при вязкости жидкости $\mu=50$ Па·с; при $\mu=4$ Па·с; при $\mu=450$ Па·с?
12. Указать последовательность исследования зависимости $N_n = f(\rho)$.
13. Физический смысл центробежных критериев Рейнольдса и Фруда.
14. Физический смысл критерия мощности.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А.Г. Касаткин.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.
2. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]/В.Н. Стабников, В.М. Лысянкий, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985 – 503с.
3. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии. [Текст]/ П.Г. Романков, М.И. Курочкина – Л.: Химия, 1974 – 289 с.

7 Лабораторная работа № 7

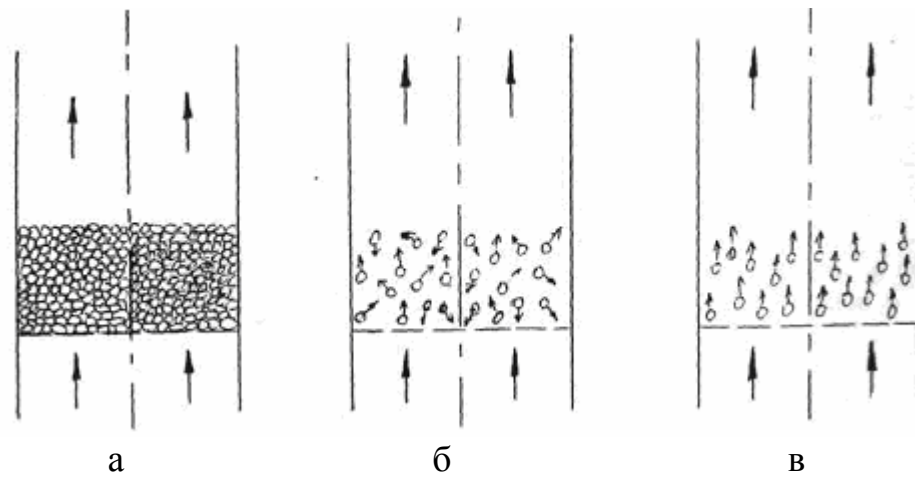
Исследование процесса псевдооживления

Цель работы. Исследование воздушного потока в цилиндрическом канале. Изучение процесса псевдооживления зернистых слоев, его теоретических основ и определение скорости витания различных продуктов.

7.1 Теоретические положения

За последнее время значительное распространение в отраслях промышленности получили процессы, связанные с взаимодействием газов, реже – капельных жидкостей, со слоем мелкодробленых твердых частиц, находящихся в кипящем или псевдооживленном состоянии. Аппараты с кипящим слоем используются для перемешивания и смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов. Отметим только, что псевдооживлению подвергаются частицы значительно меньших размеров, чем частицы материалов, находящихся в неподвижном слое. Гидравлическое сопротивление кипящего слоя при этом относительно невелико, а уменьшение размеров частиц приводит к увеличению поверхности контакта их с потоком и снижает сопротивление диффузии внутри частиц при взаимодействии между твердой и газовой (или жидкой) фазами. В результате возрастает скорость протекания многих процессов. На рисунке 7.1 показаны три возможных состояния слоя твердых частиц в зависимости от скорости восходящего потока.

При относительно небольших скоростях зернистый слой остается неподвижным (рисунок 7.1, а), и его характеристики (удельная поверхность, порозность и т.д.) не меняются с изменением скорости потока. Жидкость при этом фильтруется через слой. Однако когда скорость достигает некоторой критической величины, слой перестает быть неподвижным, его порозность и высота увеличиваются, слой приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее состояние (псевдооживленное состояние). В таком слое твердые частицы интенсивно перемешаются в потоке в различных направлениях (рисунок 7.1, б), и весь слой напоминает кипящую жидкость, ограниченную ясно выраженную верхней границей раздела с потоком, прошедшим слой. При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота возрастают вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения, при котором слой разрушается, и новые частицы начинают уноситься потоком (рисунок 7.1, в), явление массового уноса твердых частиц потоком газа называют пневмотранспортом и используют в промышленности для перемещения сыпучих материалов. Типичные графики изменения высоты зернистого и перепада давлений в нем (гидравлического сопротивления) в зависимости от фиктивной скорости газа (скорости, отнесенной ко всему сечению аппарата) представлены на рисунке 7.2.



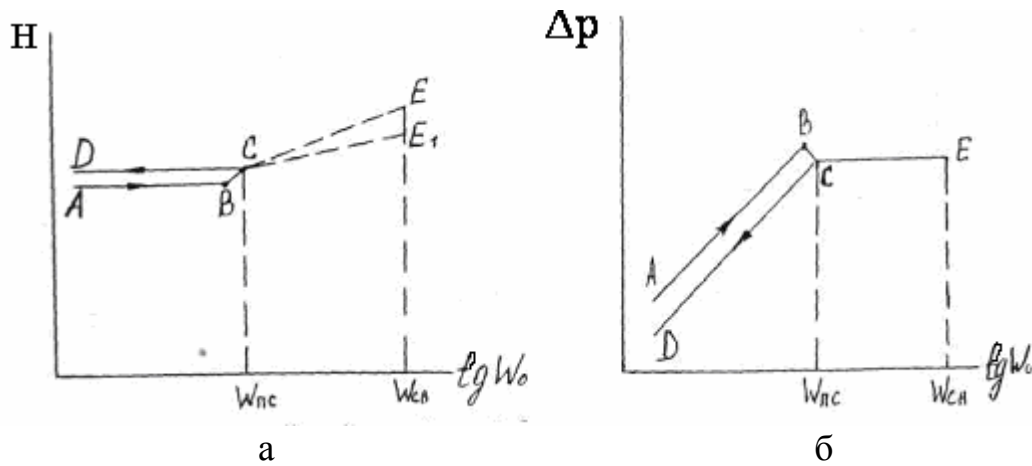
а

б

в

а - неподвижный слой; б - кипящий (псевдооживленный) слой; в - унос твердых частиц

Рисунок 7.1 – Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц



а

б

Рисунок 7.2 – Зависимость высоты зернистого слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от скорости потока

Скорость, при которой нарушается неподвижность слоя, и он начинает переходить в псевдооживленное состояние, называют скоростью начала псевдооживления и обозначают через $w_{ПС}$. При увеличении скорости газа до значения, равного $w_{ПС}$, сопротивление зернистого слоя, как следует из рисунка 7.2 б, возрастает с увеличением w_0 , а его высота практически не изменяется (линия АВС на рисунке 7.2, а). Начало псевдооживления наступает при равенстве сил гидравлического сопротивления слоя весу его частиц. Однако в действительности перепад давлений в слое, соответствующий точке В (рисунок 7.2), т.е. непосредственно перед началом псевдооживления (точка С), несколько больше, чем это необходимо для поддержания слоя во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сил сцепления между частицами слоя, находящегося в покое. Когда скорость потока достигает значения $w_{ПС}$, частицы преодолевают силы сцепления и перепад давлений становится равным весу частиц, приходящемуся на единицу площади поперечного сечения аппарата.

Из рисунка 7.2 б видно, что указанное условие выполняется для всей

области существования псевдооживленного слоя (линия СЕ), вплоть до того момента, когда скорость становится такой, при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц потоком. Эту скорость называют скоростью уноса, или иначе, скоростью свободного витания частиц и обозначают символом ω_{CB} . Последнее название обусловлено тем, что при массовом уносе порочность слоя настолько велика (приближается к 1), что движение частиц можно считать независимым от воздействия других частиц слоя. Каждая отдельная частица свободно витает, т.е. не осаждается и не уносится потоком при условии, что ее вес в среде уравнивается силой сопротивления, возникающей при обтекании частицы потоком. Значение ω_{CB} может быть найдено исходя из этого условия. Малейшее превышение скорости ω_0 над величиной ω_{CB} , приводит к уносу частицы. Таким образом, условия витания частицы в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде. Поэтому скорости ω_0 , можно определить так же, как скорости осаждения.

В случае уменьшения скорости потока после псевдооживления слоя наблюдается явление гистерезиса: зависимость гидравлического сопротивления от скорости потока выражается не линией АВС (рисунок 7.2, б), а прямой СД, расположенной ниже. Это связано с тем, что порозность слоя (неподвижного) по окончании его псевдооживления становится несколько выше, чем до псевдооживления. Последнее подтверждается также данными рисунка 7.2, а высота неподвижного слоя после псевдооживления (ордината линии СД) больше, чем она была до псевдооживления (ордината линии АВ). Если вновь начать подачу газа в образованный путем псевдооживления более порозный слой, то при увеличении скорости получается зависимость, соответствующая линии СД, и явление гистерезиса не наблюдается. Пределы существования псевдооживленного слоя ограничены снизу скоростью $\omega_{ПС}$, и сверху – скоростью витания ω_{CB} . Надо отметить, что резкий переход от неподвижного к псевдооживленному состоянию зернистого слоя характерен лишь для слоев частиц одинаковой дисперсности. Для полидисперсных слоев существует не скорость псевдооживления, а область скоростей псевдооживления, в которой начинается и завершается переход от неподвижного к полностью псевдооживленному слою. Отношение рабочей скорости ω_0 , значение которой должно находиться в пределах между $\omega_{ПС}$ и ω_{CB} , к скорости начала псевдооживления называют числом псевдооживления и обозначают символом K_ω

$$K_\omega = \frac{\omega_0}{\omega_{ПС}} \quad (7.1)$$

Число псевдооживления характеризует интенсивность перемешивания частиц и состояние псевдооживленного слоя. Опытным путем найдено, что во многих случаях интенсивное перемешивание достигается уже при $K_\omega = 2$.

Оптимальные значения K_ω устанавливаются обычно практически для каждого конкретного технологического процесса и могут изменяться в довольно широких пределах.

При $\omega_0 > \omega_{ПС}$, т. е. при $K_\omega > 1$, характеристики кипящих слоев неодинаковы при их псевдооживлении с помощью газа или капельной жидкости. При этом увеличение скорости приводит к соответствующему возрастанию высоты слоя без каких-либо заметных колебаний его верхней границы. Расстояние между частицами в данном случае увеличивается постепенно, а жидкость движется в свободном объеме между ними сплошным потоком. Однако чаще всего в промышленности используют процессы псевдооживления в системе газ–твердая фаза. Для этой системы псевдооживление, как правило, не является неоднородным: часть газа движется через слой не сплошным потоком, а в виде пузырей, которые разрушаются, достигнув верхней границы слоя, что вызывает колебания высоты слоя. На рисунке 7.2, а показаны пунктиром (линии СЕ, СЕ1) пределы колебаний высоты псевдооживленного слоя. Пока значения числа псевдооживления не очень велики, неоднородность слоя не оказывает отрицательного воздействия на его характеристики, а движущиеся пузыри, наоборот, интенсифицируют перемешивание частиц в слое. Однако при значительном увеличении скорости газа неоднородность слоя возрастает, сквозь слой все чаще прорываются более крупные пузыри и начинается интенсивное выбрасывание твердых частиц над поверхностью слоя (рисунок 7.3, а), пузыри газа могут увеличиваться в объеме столь значительно, что, наконец, их размер достигает диаметра аппарата (рисунок 7.3, б). При этом псевдооживленный слой разделяется на отдельные части газовыми пробками; часть слоя, находящаяся над пробкой, подбрасывается вверх, что приводит к большому выбросу твердых частиц. Такой режим работы называется поршневым псевдооживлением. Его возникновению способствует, кроме возрастания скорости газа, увеличение размеров частиц и уменьшение диаметра аппарата. Поршневой режим нежелателен, так как при нем резко ухудшается равномерность контакта между газом и твердыми частицами. При псевдооживлении некоторых материалов однородность слоя нарушается также вследствие каналообразования, при котором происходит проскок («байпасирование») значительного количества газа (жидкости) через один или несколько каналов, образующихся в слое. Каналообразование особенно часто наблюдается при применении материалов с очень мелкими или слипающимися частицами, склонными к агломерациям. Предельным случаем каналообразования является фонтанирование, при котором поток газа (или жидкости) прорывается сквозь слой по одному большому каналу, возникающему близ оси аппарата.

Режим псевдооживления, соответствующий изменению скоростей в пределах от $\omega_{ПС}$ до $\omega_{СВ}$, называют псевдооживлением в плотной фазе, в отличие от режима, при котором $\omega_0 > \omega_{СВ}$ и происходит пневмотранспорт твердых частиц в разбавленной фазе кипящего слоя. Теперь рассмотрим силы, действующие на частицу, находящуюся в восходящем потоке газа.

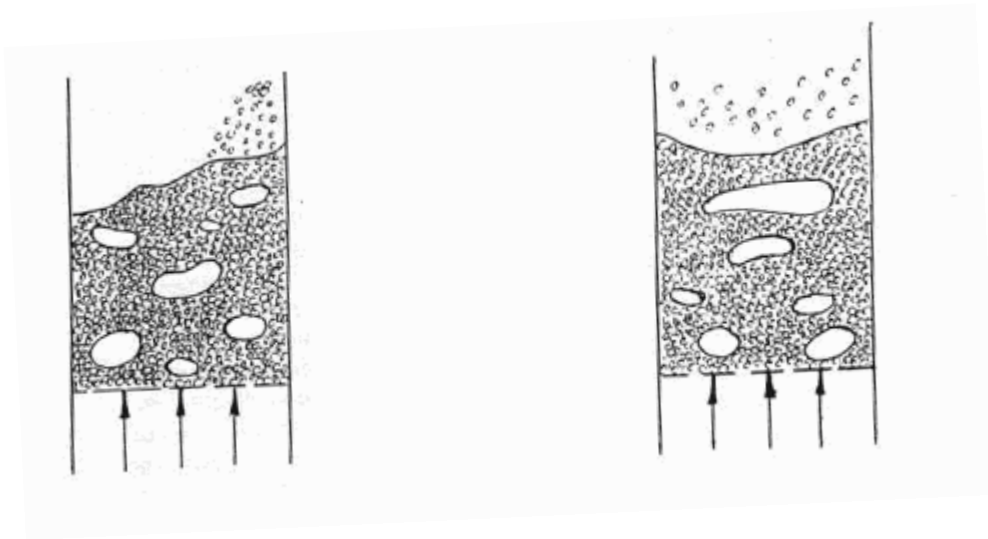
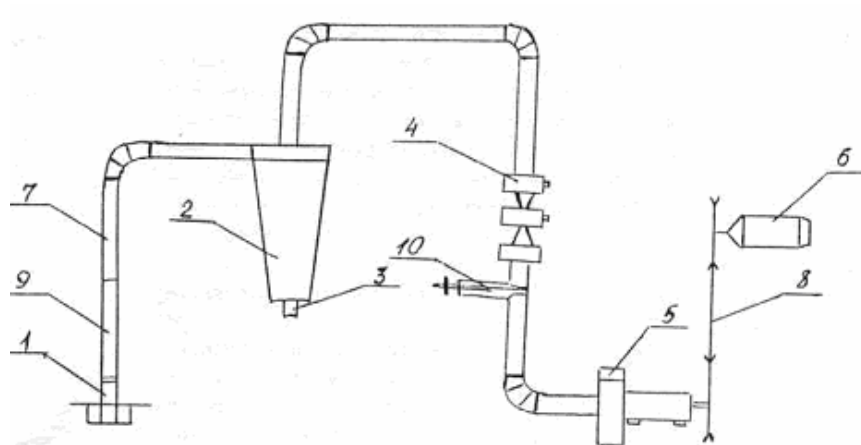


Рисунок 7.3 – Возрастание неравномерности псевдооживления с увеличением скорости газа.



1 - загрузочное устройство; 2 - циклон; 3 - стакан; 4 - труба Вентури; 5 - вентилятор; 6 - электродвигатель; 7 - воздуховод; 8 - передача клиноремная; 9 - труба из оргстекла; 10 - заслонка.

Рисунок 7.4 – Схема лабораторной установки

На частицу, находящуюся в восходящем потоке газа, действуют следующие силы.

Сила тяжести G

$$G = V_{\text{ч}} \cdot \gamma_{\text{ч}}, \quad (7.2)$$

где $V_{\text{ч}}$ – объем частицы, м^3 ;

$\gamma_{\text{ч}}$ – удельный вес материала частицы, $(\text{Н}/\text{м}^3)$.

Сила P – сила, являющаяся равнодействующей сил лобового давления и тангенциальных (касательных) сил, иначе сил трения частицы и воздуха.

Многочисленные исследования показывают, что сила действия струи газа на частицу зависят от квадрата относительной скорости $v = v_b - v_r$, площади миделевого сечения F_a , формы частицы, состояния ее поверхности. Эта зависимость выражается формулой

$$P = \sigma \cdot F_a \cdot \frac{\gamma \cdot v^2}{2 \cdot g}, \quad (7.3)$$

где ξ – коэффициент сопротивления, зависящей от формы частицы, состояния поверхности и критерия Рейнольдса;

F_a – аэродинамическое сопротивление сечения частицы (миделевого сечения – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению скорости струи газа), m^2 ;

γ – удельный вес воздуха, H/m^3 .

Эта равнодействующая силы преодолевает силу сопротивления среды и силу тяжести и сообщает телу ускорение. Если направление потока и скорость движения частицы считать положительными, т.е. направленными вверх, то уравнение движения частицы будут иметь вид

$$P - G = ma \quad (7.4)$$

Для случая, когда $v_g = v_{вит}$ справедлива зависимость

$$P - G = 0 \quad (7.5)$$

Т.е. сопротивление частицы равняется ее весу и одновременно

$$mg = \sigma \cdot F_a \cdot \frac{v_{вит}^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g}, \quad (7.6)$$

где $v_{вит}$ – скорость витания частицы, м/с.

Из (7.6) следует, что

$$v_{вит} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot m \cdot g}{\sigma \cdot F_a \cdot \gamma}} \quad (7.7)$$

Таким образом, величина скорости витания частицы зависит от веса частицы, аэродинамического сечения частицы и коэффициента ее сопротивления. Вследствие турбулентного движения потока в трубе частица непрерывно меняет свое положение в потоке воздуха, а поэтому и величина аэродинамического сечения частицы F_a и коэффициента сопротивления ξ не остаются постоянными. Исключения составляют только частицы, имеющие

форму шара, для которых F_a и ξ остаются постоянными при любом их положении в потоке. Из сказанного следует, что аналитическим путем скорость витания можно определить, строго говоря, для частиц материала, имеющих форму шара, поскольку все величины в уравнении заданы однозначно. Подставляя в (7.7) значение

$$F_a = \frac{\rho \cdot d^2}{4} \quad (7.8)$$

$$G_{\text{ч}} = m \cdot g = \frac{\rho \cdot d^3 \cdot \Gamma_{\text{ч}}}{6}, \quad (7.9)$$

где d – диаметр частицы, м.

Для частицы формы шара будем иметь

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d \cdot \Gamma_{\text{ч}}}{\rho \cdot \Gamma_{\text{в}}}} \quad (7.10)$$

Величина коэффициента сопротивления частицы зависит от числа Рейнольдса. Для области действия закона Стокса (в которой скорость падения пропорциональна квадрату диаметра частицы, удельному весу материала и обратно пропорциональна вязкости среды) для шаровой частицы

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{d \cdot \Gamma_{\text{г}}}{0,41 \cdot \Gamma}} = \sqrt{27,8 \cdot d \cdot \frac{\Gamma_{\text{ч}}}{\Gamma}} \quad (7.11)$$

Для частиц, имеющих форму, отличную от шара, скорость витания аналитическим путем можно определить только весьма приблизительно. Для этого частицу, скорость витания которой необходимо определить, заменяют эквивалентным шаром, т.е. таким шаром, вес которого равен весу рассматриваемой частицы. В этом случае диаметр этого эквивалентного шара определяется условием

$$Q = V \cdot S \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot d_3^3}{6} \cdot \Gamma_{\text{ч}}} \quad (7.12)$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6}{\rho} \cdot V} = 1,24 \cdot \sqrt[3]{V} \quad (7.13)$$

Подставив (7.13) в (7.11), получим формулу для определения скорости витания частиц неправильной формы (7.14).

Однако расчетные данные, полученные по этим формулам, являются

весьма приближенными, поэтому в большинстве случаев определение скоростей витания ведут экспериментальным путем.

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{\Gamma_{\text{ч}}}{0,41 \cdot \Gamma}} \cdot 1,24 \cdot \sqrt[3]{V} \quad (7.14)$$

В литературе имеется много теоретических, экспериментальных и экспериментально-теоретических методик для определения скоростей витания. Но, к сожалению, почти все они относятся к случаю определения скоростей витания отдельных частиц, в то же время как при пневматическом транспортировании происходит движение массы различных частиц одного и того же материала. В связи с этим, правильнее всего определять скорость витания массы частиц, т.н. средневзвешенную скорость витания или скорость уноса, что и должно быть выполнено в настоящей лабораторной работе.

7.2 Содержание

Работа заключается в экспериментальном исследовании навески продукта (массой 200 г), которая выдается преподавателем. В пневмокласификаторе продукт разделяется на несколько отнесов с различными скоростями витания. Каждый относ разбирается на фракции (шелуха, ядро и т.д.), и по полученным результатам строятся полигоны в зависимости от скоростей витания. На основе экспериментальных данных делается вывод о возможности разделения продуктов на фракции на пневмосепараторах.

7.3 Оборудование

Экспериментальная установка – парусный пневмокласификатор состоит из вентилятора 5, циклона 2 и загрузочного устройства 1. Установка работает во всасывающем режиме. Привод ее осуществляется электродвигателем, который посредством клиноременной передачи 8 приводит в движение вентилятор 5. Забор воздуха производится в загрузочном устройстве 1. Для наблюдения за явлением псевдооживления часть воздухопровода 7 выполнена из органического стекла 9.

Воздух, вместе с унесенными частицами по воздухопроводу 7 поступает в циклон 2, где происходит выделение продукта и накопление его в стакане 3. Для определения расхода и его скорости используется труба Вентури 4, к которой подключается манометр. Для измерения расхода используется заслонка 10, которая при помощи винтовой подачи плавно изменяет зазор.

7.4 Порядок выполнения работы

7.4.1 Ознакомиться с устройством и принципом работы экспериментальной установки, правилами эксплуатации и техники

безопасности.

7.4.2 По заданию преподавателя, берем навеску массой 150-200 г, засыпаем в стакан и устанавливаем его в пневмосепарирующий канал.

7.4.3 Устанавливаем на столе манометр и подключаем его к первому штуцеру трубки Вентури (первый штуцер измеряет P1, второй P2).

7.4.4 Закрыв заслонкой воздухопровода до упора, включаем вентилятор

7.4.5 Постепенно открываем заслонку до показания манометра $l=30$ мм при $K=0,2$.

7.4.6 Оставляя заслонку неподвижной, замеряем. Данные заносим в таблицу 7.1.

7.4.7 Продув продукт 2-3 мин, выключаем вентилятор, и полученные отходы из стеклянного стакана циклона высыпаем на разборную доску. После разбора полученных фракций заносим в таблицу 7.2.

7.4.8 Получаем отходы при $l=80, 100, 120, 140$ мм.

7.4.9 Полученные фракции тщательно перемешиваем и повторяем опыт еще два раза.

7.4.10 Обрабатываем полученные данные.

Среднюю скорость воздушного потока в пневмосепарирующем канале находим по следующей скорости

$$V = K_v \cdot \sqrt{10 \cdot \Delta P}, \quad (7.15)$$

где K_v - коэффициент для трубы Вентури ($K_v = 11,4$).

Процентное содержание фракции в отходе определяем по следующей формуле

$$F = \frac{Q_i}{Q_o} \cdot 100 \quad (7.16)$$

где Q_i – масса фракции в отход, кг;
 Q_o – общая масса фракции, кг.

По полученным данным строим полигоны по скорости витания для каждой фракции на одном графике.

На основании сравнения полигонов делаем вывод о возможности разделения на пневмосепараторах.

Контрольные вопросы

1. Объясните явление гистерезиса при псевдооживлении.
2. Что называется числом псевдооживления
3. Объясните термины: скорость псевдооживления, скорость свободного витания
4. Чем отличается однородное псевдооживление от неоднородного.
5. Объясните режим работы: в плотной фазе; в разбавленной фазе;

поршневое псевдооживление, каналообразование; фонтанирование.

6. Расчетные формулы.

7. Методика проведения эксперимента.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А.Г. Касаткин.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.

2. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]/В.Н. Стабников, В.М. Лысянкий, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985 – 503с.

3. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии. [Текст]/ П.Г. Романков, М.И. Курочкина – Л.: Химия, 1974 – 289 с.

8 Лабораторная работа № 8

Определение коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате типа «труба в трубе»

Цель работы. Закрепления знаний теории подобия и моделирования процессов конвективного теплообмена. Изучение процесса теплообмена на действующем аппарате. Определение коэффициента теплопередачи по данным испытаниям.

8.1 Основы теории и постановка задачи исследования

Тепловые балансы. На предприятиях пищевой, мясомолочной промышленности и сфере общественного питания широко распространены процессы тепловой обработки продуктов. Вещества, участвующие в теплообмене, называются теплоносителями. Более нагретый теплоноситель часто называют греющим агентом, а менее нагретый теплоноситель – охлаждающим агентом. Перенос тепла одного теплоносителя к другому теплоносителю осуществляется в теплообменных аппаратах (теплообменниках). При этом тепло, отдаваемое греющим агентом (Q_1), затрачивается на нагрев охлаждающего агента (Q_2), и некоторая относительно большая часть тепла расходуется на компенсацию потерь тепла аппаратом в окружающую сферу (Q_n). Тогда уравнение теплового баланса для теплообменника можно записать:

$$Q_1 = Q_2 + Q_n \quad (8.1)$$

Для теплообменников, покрытых слоем тепловой изоляции, величина Q_n не превышает 3-5 % полезно используемого тепла, поэтому с практически приемлемой точностью можно принять

$$Q_1 = Q_2 \quad (8.2)$$

Если теплообмен между жидкостями или газами осуществляется без изменения их агрегатного состояния в непрерывнодействующих (поточных) теплообменных аппаратах, то уравнение теплового баланса (8.2) имеет вид

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к}) = G_2 \cdot c_2 (t_{2н} - t_{2к}) \quad (8.3)$$

где Q – тепловой поток от греющего агента к охлаждающему агенту, Вт;
 c_1 – удельная теплоемкость греющего агента, Дж/(кг·К);
 G_1 – расход греющего агента, кг/с;
 $t_{1н}$ и $t_{1к}$ – начальная и конечная температура греющего агента, °С;

G_2 – расход охлаждающего агента, кг/с;
 c_2 – удельная теплоемкость охлаждающего агента, Дж/(кг·К);
 $t_{2н}$ и $t_{2к}$ – начальная и конечная температура охлаждающего агента, °С.

При нагревании жидкостей или газов сухим насыщенным паром в поточных теплообменниках уравнение теплового баланса (8.2) принимает вид:

$$Q = D \cdot (i_n - G_{\text{конд}} \cdot t_{\text{конд}}) = G_2 c_2 \cdot (t_{2к} - t_{2н}) \quad (8.4)$$

где D – расход пара, кг/с;
 i_n – энтальпия пара, Дж/(кг·К);
 $c_{\text{конд}}$ – удельная теплоемкость конденсата, Дж/(кг·К);
 $t_{\text{конд}}$ – температура конденсата, °С

В зависимости от способа передачи тепла различают три основных группы теплообменников:

1) поверхностные теплообменники, в которых перенос тепла между теплоносителями происходит через разделяющую их поверхность (стенку);

2) теплообменники смешения, в которых тепло передается от одного теплоносителя к другому теплоносителю при их непосредственном соприкосновении;

3) регенераторные теплообменники, работающие в нестационарном режиме, в которых обмен жидких и газовых теплоносителей происходит за счет их прикосновения с ранее нагретыми твердыми телами – насадкой, заполняющей аппараты и периодически нагреваемой другим (горячим) теплоносителем. Для осуществления теплообменных процессов в пищевой технологии наиболее пригодны поверхностные теплообменники.

Основные уравнения теплопередачи. Расчет и анализ работы поверхностных теплообменников, работающих в стационарном режиме, выполняют, пользуясь основными уравнениями теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t_{cp}, \quad (8.5)$$

где Q – тепловой поток от греющего агента к охлаждающему агенту через разделяющую их стенку, Вт;

K – коэффициент теплопередачи от греющего к охлаждающему агенту, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности теплопередачи, м²;

Δt_{cp} – средний температурный напор (средняя движущая сила процесса теплопередачи в теплообменнике), К.

Для нахождения среднего температурного напора составляют графики изменения температуры теплоносителей. На рисунке 8.1 показан общий вид данных графиков для прямоточного и противоточного движения теплоносителей без изменения их агрегатного состояния, а также общий вид температурного графика при обогреве конденсирующимся паром. В

обозначениях рисунок 8.1 средний температурный напор определяется по следующему теоретическому уравнению

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}} \quad (8.6)$$

где Δt_{δ} – движущая сила процесса теплопередачи на том конце аппарата, где она больше (т.е. большая разность температур теплоносителей);

Δt_{m} – движущая сила процесса теплопередачи на том конце аппарата, где она меньше (т.е. меньшая разность температур теплоносителей).

Если $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} \leq 2$, то с достаточной точностью (ошибка менее 5%) вместо среднелогарифмической разности температур (формула 8.6) можно принять среднеарифметическую разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{m}}{2} \quad (8.7)$$

При расчете коэффициента теплопередачи полагают, что процесс теплопередачи состоит из трех элементарных актов, протекающих последовательно друг за другом:

- процесса теплоотдачи от греющего агента к стенке аппарата, разделяющие теплоносители;
- переноса тепла теплопроводностью через стенку аппарата;
- процесса теплоотдачи от стенки аппарата к охлаждающему агенту.

По этой причине коэффициент теплопередачи является аддитивной величиной, определяемой интенсивностями каждого из указанных элементарных актов:

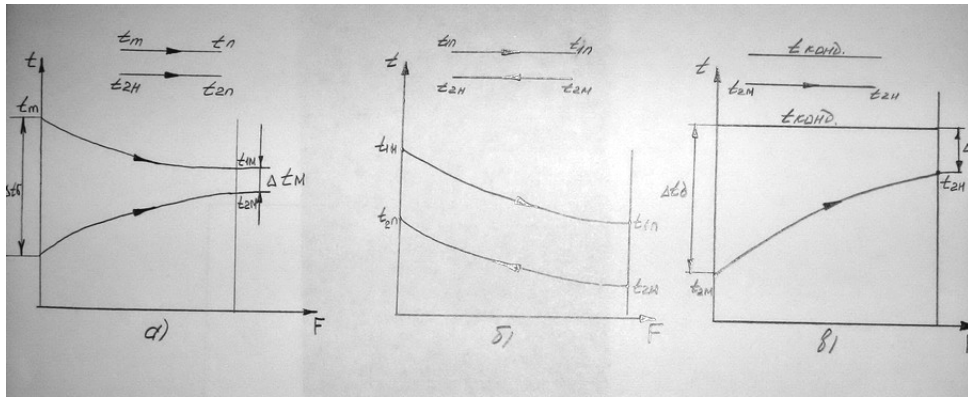
$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8.8)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего агента к стенке аппарата, Вт/(м²·К);

δ – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к охлаждающему агенту, Вт/(м²·К).



а) проток без изменения агрегатного состояния; б) противоток без изменения агрегатного состояния; в) при обогреве конденсирующимся паром.
Рисунок 8.1 – Графики изменения температур теплоносителей

Термическое сопротивление. Анализируя зависимость (8.8), необходимо отметить, что величина $\frac{1}{\alpha_1} = r_1$ называется термическим сопротивлением. Соотношение $\frac{\delta}{\lambda} = r_{cm}$ является термическим сопротивлением самой стенки аппарата. Величина $\frac{1}{\alpha_2} = r_2$ называется термическим сопротивлением при переходе тепла от стенки аппарата к охлаждающему агрегату. Очевидно, что общее термическое сопротивление при теплопередаче составляет, $\frac{m^2 \cdot K}{Вт}$,

$$R = r_1 + r_{cm} + r_2 \quad (8.9)$$

И оно обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи:

$$K = \frac{1}{R} \text{ или } R = \frac{1}{K} \quad (8.10)$$

Если теплообменная поверхность является многослойной и имеет загрязнение, то ее термическое сопротивление складывается из термических сопротивлений всех слоев и термического сопротивления загрязнений

$$r_{cm} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum r_{загр}, \quad (8.11)$$

где n – число слоев стенки,

$\sum r_{загр}$ – суммарное термическое сопротивление загрязнений.

Тогда общее термическое сопротивление будет равно

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (8.12)$$

Коэффициент теплоотдачи. Необходимо принять во внимание, что вследствие сложной структуры потоков теплоносителей вблизи стенки аппарата (особенно при турбулентном движении) коэффициент теплоотдачи является сложной функцией многих переменных. Коэффициент теплоотдачи зависит от следующих факторов:

- скорости теплоносителя ν , его плотности ρ и вязкости μ , т.е. переменных, определяющих режим движения теплоносителя;
- тепловых свойств жидкости (удельной теплоемкости C , теплопроводности λ и коэффициента объемного расширения β);
- геометрических параметров (эквивалентного диаметра $d_{\text{э}}$ канала, длины канала l , шероховатости теплообменной поверхности Δ).

Таким образом

$$\alpha = f(\nu, \rho, \mu, c, \lambda, \beta, d_{\text{э}}, l, \Delta) \quad (8.13)$$

Из этой зависимости можно заключить, что простота расчета коэффициента теплопередачи по уравнению (8.8) является только кажущейся, и основная сложность расчета теплообменных аппаратов состоит в определении коэффициентов теплоотдачи.

Вследствие сложной зависимости коэффициента теплоотдачи от большого числа факторов невозможно получить расчетное уравнение для α , пригодное для всех случаев теплоотдачи. Однако для типовых случаев теплоотдачи путем обобщения опытных данных на основе теории подобия получены обобщенные (критериальные) уравнения, позволяющие рассчитывать коэффициенты теплоотдачи.

Критериальные уравнения. При турбулентном течении в прямых трубах ($Re > 10000$) без изменения агрегатного состояния теплоносителя критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \xi_l, \quad (8.14)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot d_{\text{э}}}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала, м;

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, $Вт/(м \cdot К)$;

$Re = \frac{\nu \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu} = \frac{\nu \cdot d_{\text{э}}}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

v – средняя скорость теплоносителя, м/с;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

μ – динамический коэффициент вязкости теплоносителя, Па·с;

$\nu = \mu/\rho$ – кинематический коэффициент вязкости теплоносителя, м²/с;

$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля при средней температуре

теплоносителя;

c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности теплоносителя, м²/с;

Pr_{cm} – критерий Прандтля теплоносителя при средней температуре поверхности стенки со стороны данного теплоносителя;

ξ_l – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент теплоотдачи отношения длины трубы l к ее диаметру d .

Для труб с $l/d > 50$ величина $\xi_l = 1,0$.

Для $l/d < 50$ и различных значений критерия Re величина ξ_l приводится в справочной литературе.

Для расчета теплоотдачи в переходной области ($2300 < Re < 10000$) можно воспользоваться приближенным уравнением

$$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43} \quad (8.15)$$

Теплоотдача при ламинарном течении в прямых трубах и каналах ($Re < 2300$) рассчитывается по следующему критериальному уравнению:

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,45} \cdot Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (8.16)$$

где $Gr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}$ – критерий Грасгофа;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – коэффициент объемного расширения, 1/градус;

Δt – разность температур жидкости и стенки (или наоборот), градус;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Во всех вышеперечисленных уравнениях значения теплофизических свойств теплоносителя отнесены к его средней температуре, которая находится следующим образом: для того теплоносителя, у которого температура изменяется в теплообменнике на меньшее число градусов, средняя температура определяется как средняя арифметическая между начальной и конечной:

$$t_{cp1} = \frac{t_{1н} + t_{1к}}{2} \quad (8.17)$$

Для второго теплоносителя среднюю температуру находят по формуле

$$t_{cp2} = t_{cp1} \pm \Delta t_{cp} \quad (8.18)$$

Формула (8.18) справедлива и в том случае, когда температура первого теплоносителя постоянна вдоль поверхности теплообмена. Нельзя упускать из виду, что все критерии подобия безразмерны, так как каждый из них выражает отношение каких-либо двух однородных конкурирующих факторов.

Критерий Рейнольдса характеризует режим движения жидкости и является мерой соотношения сил инерции и трения (вязкости) в потоке жидкости. Критерий Грасгофа является мерой отношения сил трения (вязкости) к подъемной силе, определяемой разностью плотностей в различных точках неизотермического потока.

Критерий Нуссельта характеризует подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации. При пленочной конденсации насыщенного пара на плоской или цилиндрической вертикальной поверхности коэффициент теплоотдачи рассчитывается по уточненной формуле Нуссельта:

$$\alpha = 1,15 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r \cdot g}{\mu \cdot \Delta t \cdot h}}, \quad (8.19)$$

где $\Delta t = t_{конд} - t_{ст}$ – разность температур конденсации и стенки;

λ, ρ, r, μ – теплофизические свойства конденсата, взятые при температуре $t = (t_{конд} + t_{ст})/2$;

h – высота поверхности, м.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации насыщенного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы применяется формула:

$$\alpha = 0,72 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r \cdot g}{\mu \cdot \Delta t \cdot d}}, \quad (8.20)$$

где d – диаметр трубы, м. Остальные обозначения известны.

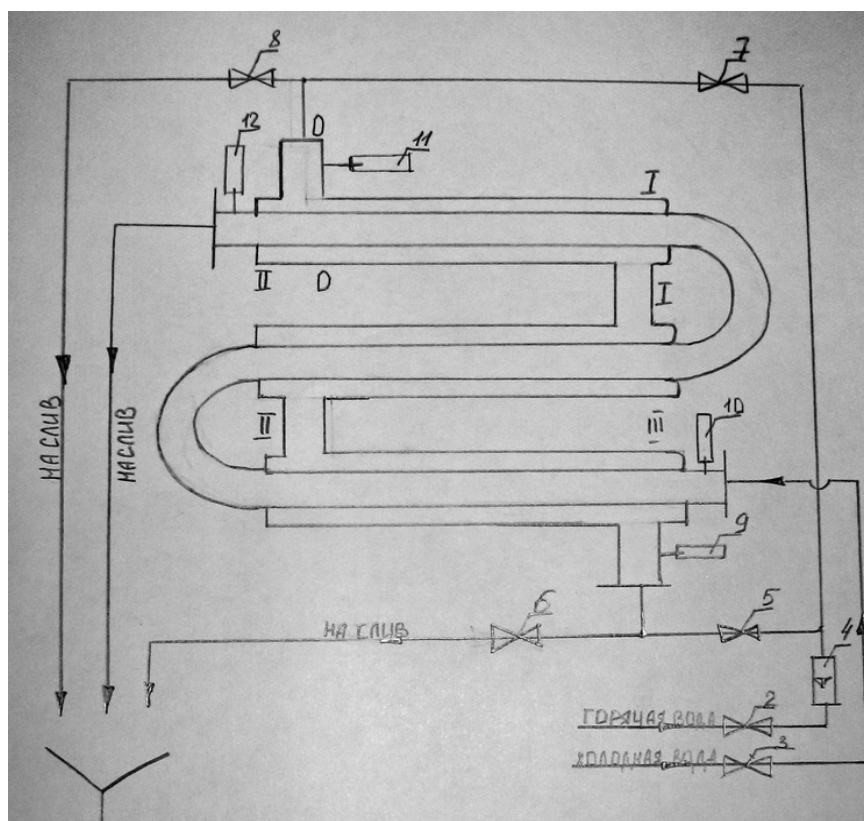
В данной работе предлагается провести испытание работы теплообменника, определить коэффициенты теплоотдачи для греющего и охлаждающего агентов и рассчитать коэффициент теплопередачи.

8.2 Описание установки

Схема лабораторной установки показана на рисунке 8.2. Основным элементом установки является теплообменник «труба в трубе» 1, состоящий из трех горизонтальных элементов, расположенных друг над другом и покрытых теплоизоляцией. Стальные трубы теплообменника имеют диаметр: наружные 25x2 мм, внутренние – 12x1,5 мм (первое число означает внешний диаметр трубы, второе – толщину стенки). Рабочая длина каждого элемента составляет 0,75 м. Горячая вода проходит по межтрубному пространству, а холодная вода движется по внутренним трубам снизу вверх. Расход горячей воды регулируется вентилем 2 и измеряется при помощи ротаметра 4 и его тарировочного графика, находящегося на щите установки. Вентили 5, 6, 7 и 8 позволяют подавать горячую воду либо снизу вверх через межтрубное пространство, обеспечивая прямоток теплоносителей, либо сверху вниз, обеспечивая противоток теплоносителей. В первом случае (при прямотоке) открыты вентили 5 и 8 и закрыты вентили 6 и 7; во втором случае (при противотоке) открыты вентили 6 и 7 и закрыты вентили 5 и 8.

Термометры 9, 10, 11 и 12 позволяют измерить температуры теплоносителей при входе и выходе теплоносителей из теплообменника.

После выхода теплоносителей из теплообменника они направляются на слив в канализацию.



1 – теплообменник «труба в трубе»; 2,3,5,6,7,8 – вентили; 4 – ротаметр; 9,10,11,12 – термометры. Вентиль 3 вынесен со щита теплообменника

Рисунок 8.2 – Схема установки

8.3 Методика проведения работы

Перед началом каждого опыта все вентили должны быть закрыты. Плавно открывают вентиль 3, после чего холодная вода начинает поступать в теплообменник. Затем по заданию преподавателя устанавливают определенный расход горячей воды (при прямом токе открывают вентили 8, 5 и 2; при противотоке открывают вентили 6, 7 и 2). Через 5-7 минут после установления постоянных расходов горячей и холодной воды теплообменник выйдет на стационарный режим работы, о чем судят по постоянству во времени температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменника. После этого следует снять показания всех контрольных приборов и занести их в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Опытные данные

Схема движения теплоносителей	Начальная температура горячей воды $t_{1н}$	Конечная температура горячей воды $t_{1к}$	Расход горячей воды G_1	Начальная температура холодной воды $t_{2н}$	Конечная температура холодной воды $t_{2к}$
Прямоток					
Противоток					

8.4 Обработка опытных данных

Необходимые для расчетов данные теплофизических свойств теплоносителей берут по их средней температуре из справочников. Расчет проводят в следующей последовательности.

8.4.1 Пренебрегая тепловыми потерями, определяют расход холодной воды на основании формулы (8.3), кг/с

$$G_2 = \frac{c_1 \cdot C_1 (t_{1н} - t_{1к})}{c_2 \cdot (t_{2к} - t_{2н})} \quad (8.21)$$

8.4.2 Воспользовавшись законом сплошности потока $G = \rho \cdot v \cdot S$, определяют среднюю скорость горячей воды, м/с

$$v_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot S_1} \quad (8.22)$$

где $S_1 = \frac{\pi}{4} (D_{вн}^2 - d_n^2) = 0,785 (D_{вн}^2 - d_n^2)$

$D_{вн}$ – внутренний диаметр большой трубы, м;

d_n – наружный диаметр малой трубы, м.

Аналогичным образом находят среднюю скорость холодной воды

$$v_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot S_2} \quad (8.23)$$

8.4.3 Определяют критерий Рейнольдса для горячей и холодной воды

$$Re_1 = \frac{v_1 d_{\text{Э1}}}{\nu_1}, \text{ где } d_{\text{Э1}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{н}} \quad (8.24)$$

$$Re_2 = \frac{v_2 d_{\text{Э2}}}{\nu_2}, \text{ где } d_{\text{Э2}} = d_{\text{вн}}$$

$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр малой трубы, м.

8.4.4 Находят критерий Прандтля для греющего и охлаждающего агентов

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 \cdot c_1}{\lambda_1} = \frac{\nu_1}{a_1} \text{ и } Pr_2 = \frac{\mu_2 \cdot c_2}{\lambda_2} = \frac{\nu_2}{a_2} \quad (8.25)$$

8.4.5 Выбирают критериальное уравнение в зависимости от режима движения теплоносителей и находят по нему Nu_1 и Nu_2 (без учета поправки Pr/Pr_{cm} и G_2 , т.к. пока неизвестна температура стенки внутренней трубы теплообменника).

8.4.6 Находят коэффициент теплоотдачи от горячей воды к наружной стенке малой трубы

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_{\text{Э1}}}{d_1} \quad (8.26)$$

и коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки малой трубы к холодной воде

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_{\text{Э2}}}{d_2} \quad (8.27)$$

8.4.7 Определяют коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_1 + r_2 + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8.28)$$

где δ_{cm} - толщина стенки малой трубы, м;

λ_{cm} - коэффициент теплопроводности материала стенки (для стали $\lambda_{cm} = 46,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

r_1 и r_2 - термическое сопротивление загрязнений малой трубы со стороны горячей и холодной воды, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Значения r_1 и r_2 можно выбрать из справочников.

8.4.8. Рассчитывают средний логарифмический температурный напор

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}} \quad (8.29)$$

8.4.9 Определяют плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q = K \cdot \Delta t_{cp}, \quad (8.30)$$

8.4.10 Находят необходимую поверхность теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{Q}{q}, \quad (8.31)$$

где Q – тепловая нагрузка аппарата, Вт

8.4.11 Фактическая поверхность теплопередачи равна

$$F_{\phi} = 3 \cdot \pi \cdot d_{cp} \cdot l, \quad (8.32)$$

где $d_{cp} = \frac{(d_{вн} + d_{н})}{2}$ при $\alpha_1 \cong \alpha_2$

и $d_{cp} = d_{н}$ при $\alpha_1 \ll \alpha_2$

8.4.12 Определяют расхождения поверхностей нагрева

$$\Delta F = \left| \frac{F_{\phi} - F}{F_{\phi}} \right| \cdot 100\% \quad (8.33)$$

Далее проводится уточненный расчет с учетом температуры стенки.

8.4.13 Средняя разность температур горячей воды и стенки, градус

$$\Delta t_1 = \frac{q}{\alpha_1}, \quad (8.34)$$

8.4.14 Средняя температура стенки малой трубы со стороны горячей воды

$$t_{cm1} = t_{cp1} - \Delta t_1 \quad (8.35)$$

8.4.15 Находят Pr_{cm} при температуре t_{cm1} и находят уточненное значение коэффициента теплоотдачи

$$\alpha'_1 = \alpha_1 \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (8.36)$$

Если режим движения ламинарный, то дополнительно рассчитывают критерий Gr , подставляя в него разность температур Δt_1 , найденную в п.13. Коэффициенты объемного расширения воды даны в справочниках. Для ламинарного режима уточненное значение α'_1 находят с учетом, как поправки $\frac{Pr}{Pr_{cm}}$, так и критерия Gr .

8.4.16 Рассчитывают удельную тепловую нагрузку с учетом α'_1 :

$$q_1 = \alpha'_1 \cdot \Delta t_1 \quad (8.37)$$

8.4.17 Находят перепад температур в стенке:

$$\Delta t_{cm} = q_1 \cdot \sum r, \quad (8.38)$$

где $\sum r = r_1 + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_2$ - суммарное термическое сопротивление стенки.

8.4.18 Рассчитывают среднюю температуру стенки малой трубы со стороны холодной воды:

$$t_{cm2} = t_{cm1} - \Delta t_{cm} \quad (8.39)$$

8.4.19 Определяют разность средних температур стенки и холодной воды:

$$\Delta t_2 = t_{cm2} - t_{cp2} \quad (8.40)$$

8.4.20 Находят уточненный коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки малой трубы к холодной воде:

$$\alpha'_2 = \alpha_1 \left(\frac{Pr}{Pr_{cm2}} \right), \quad (8.41)$$

где Pr_{cm2} - критерий Прандтля для холодной воды, вычисленный при температуре стенки t_{cm2} . Если режим движения холодной воды ламинарный, то при расчете α'_2 дополнительно учитывается критерий Gr (см. п. 8.4.15).

8.4.21 Определяют удельную тепловую нагрузку

$$q_2 = \alpha'_2 \cdot \Delta t_2 \quad (8.42)$$

8.4.22 Рассчитывают расхождение удельных тепловых нагрузок

$$\Delta q = \left| \frac{q_2 - q_1}{q_2} \right| \cdot 100\% \quad (8.43)$$

При расхождении удельных тепловых нагрузок более чем на 5 % расчет повторяют в том же порядке, начиная с п.13. При этом Δt_1 уменьшают, если $q_1 > q_2$, и увеличивают, если $q_1 < q_2$, так чтобы q_1 и q_2 уравнились. После этого находят $q_{cp} = (q_1 + q_2)/2$, определяют $F = Q/q_{cp}$ и сравнивают с фактической поверхностью F_ϕ аппарата (п. 8.4.12).

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяется тепловая обработка пищевых продуктов? Какие, в соответствии с этим, различают теплообменные аппараты?
2. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.
3. От чего зависит коэффициент теплоотдачи?
4. Какие критерии подобия используются при расчете коэффициента теплоотдачи и что они характеризуют?
5. Какой физический смысл имеют критерии Re , Pr , Nu , Gr ?
6. Критериальные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи при различных режимах движения (без изменения агрегатного состояния жидкости).
7. Основное уравнение теплопередачи.
8. Физический смысл коэффициента теплопередачи. От чего он зависит?
9. Изобразите график изменения температур теплоносителей в процессе теплообмена при прямотоке и противотоке (оба теплоносителя - жидкости).
10. То же, только один из теплоносителей – пар.
11. Что называется средним температурным напором и как он определяется?
12. В чем заключается проверочный и проектный расчет теплообменного аппарата?
13. Что понимается под тепловой нагрузкой аппарата?
14. Уравнение теплового баланса теплообменника при обогреве жидкости жидкостью.
15. Уравнение для определения в аппарате удельного теплового потока:

- а) от горячего потока к стенке;
 - б) от поверхности нагрева к холодному потоку;
 - в) через поверхность нагрева;
 - г) от горячего потока к холодному через поверхность нагрева.
16. Как определяется температура стенки со стороны горячего и со стороны холодного теплоносителя?
17. Чем определяется выбор скорости теплоносителей в аппарате?
18. Как влияет скорость потока на величину коэффициента теплоотдачи в теплообменном аппарате?
19. Пути интенсификации работы теплообменных аппаратов.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А.Г. Касаткин.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.
2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии [Текст]/ Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. – М.: Колос, 1997 – 264 с.
3. Лунин О.Г. Теплообменные аппараты пищевых производств [Текст]/О.Г. Лунин, В.Н. Вельтищев – М.: Агропромиздат, 1987 – 239 с.
4. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств [Текст]/ под ред. проф. С.М. Гребенюка и доц. И.М. Михеевой. – М.: Агропромиздат, 1987 – 215 с.

9 Лабораторная работа № 9

Испытание теплообменника в режимах прямотока и противотока теплоносителей и выбор его теплоизоляции

Цель работы. Изучение распределения температур теплоносителей по длине теплообменника. Определение коэффициента регенерации тепла в теплообменнике. Определение необходимой тепловой изоляции.

9.1 Основы теории и постановка задачи исследования

Распределение температур теплоносителей по длине аппарата. При теплообмене температуры теплоносителей, в общем случае, непрерывно изменяются по длине теплообменных аппаратов, поэтому движущая сила процесса (разность температур теплоносителей) является переменной величиной и в общем случае численно не равна значению, определяющему по средне-логарифмическому выражению движущей силы (формула 8.6) в работе № 8. На рисунке 9.1 показано изменение температур теплоносителей при прямотоке в отсутствие изменения их агрегатного состояния. В самом деле, движущая сила теплообмена при входе теплоносителей в аппарат наибольшая и составляет Δt_n ; вдоль поверхности теплообмена движущая сила непрерывно уменьшается, и при выходе теплоносителей из аппарата она является наименьшей и составляет Δt_k .

На элементе поверхности теплообмена dF греющий агент охлаждается на dt_1 градусов, а охлаждающий агент нагревается на dt_2 градусов. Уравнение теплового баланса для элемента поверхности dF имеет вид

$$dQ = G_1 \cdot c_1 \cdot (-dt_1) = G_2 \cdot c_2 \cdot dt_2 \quad (9.1)$$

где G_1 и G_2 – расходы соответственно греющего агента и охлаждающего агента, кг/с;

c_1 и c_2 – удельные теплоемкости соответственно греющего агента и охлаждающего агента, Дж/(кг · К).

Из уравнения (9.1) выразим изменения температур:

$$-dt_1 = \frac{dQ}{G_1 \cdot C_1} \text{ и } dt_2 = \frac{dQ}{G_2 \cdot C_2} \quad (9.2)$$

Произведение $G \cdot C = W$ называется водяным эквивалентом, поэтому изменения температур будут

$$-dt_1 = \frac{dQ}{W_1} \text{ и } dt_2 = \frac{dQ}{W_2} \quad (9.3)$$

Складывая эти выражения, получим

$$-dt_1 + dt_2 = dQ \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) \quad (9.4)$$

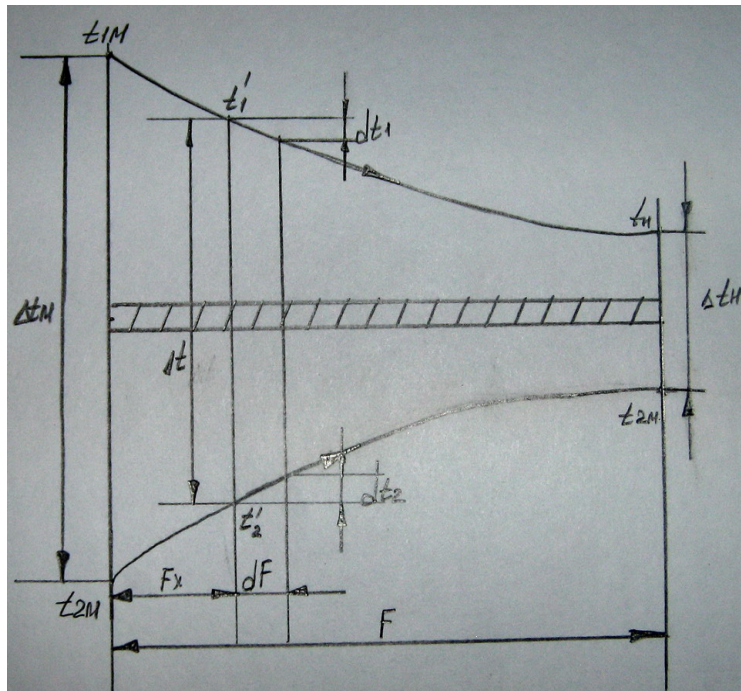


Рисунок 9.1 – Изменение температур теплоносителей и движущей силы процесса при прямотоке.

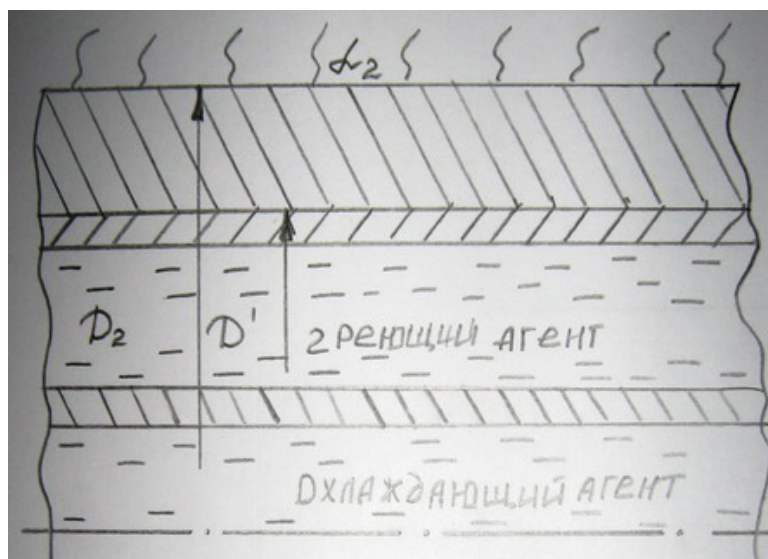


Рисунок 9.2 – Схема к расчету теплоизоляции

или

$$dt_1 - dt_2 = -dQ \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) \quad (9.5)$$

Обозначим $\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} = m$. Тогда получается

$$d(t_1 - t_2) = -dQm \quad (9.6)$$

или

$$d(\Delta t) = -dQm \quad (9.7)$$

По основному уравнению теплопередачи $dQ = k \cdot dF \cdot \Delta t$, поэтому формула (9.7) примет вид

$$d(\Delta t) = -k \cdot dF \cdot \Delta t \cdot m \quad (9.8)$$

Разделим переменные и интегрируем полученное выражение в пределах изменения Δt вдоль всей поверхности теплообмена от $\Delta t_H = t_{1H} - t_{2H}$ до $\Delta t_K = t_{1K} - t_{2K}$ и dF от 0 до F . При этом принимаем коэффициент теплопередачи постоянной величиной. Тогда

$$\int_{\Delta t_H}^{\Delta t_K} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -m \cdot k \cdot \int_0^F dF \quad (9.9)$$

или

$$\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H} = m \cdot k \cdot F \quad (9.10)$$

Из формулы (9.10) получается

$$\Delta t_K = \Delta t_H \cdot e^{-m \cdot k \cdot F} \quad (9.11)$$

Уравнение теплового баланса для всей поверхности теплообмена

$$Q = W_1(t_{1H} - t_{1K}) = W_2(t_{2K} - t_{2H}), \quad (9.12)$$

Откуда

$$m = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} = \frac{t_{1H} - t_{1K}}{Q} + \frac{t_{2K} - t_{2H}}{Q} = \frac{(t_{1H} - t_{2H}) - (t_{1K} - t_{2K})}{Q} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{Q} \quad (9.13)$$

Подставив это значение m в уравнение (9.10), находим

$$\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H} = -K \cdot \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{Q} \cdot F \quad (9.14)$$

Отсюда получается

$$Q = -k \cdot F \cdot \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H}} = k \cdot F \cdot \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} \quad (9.15)$$

Сопоставляя это выражение с основным уравнением теплопередачи $Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$, приходим к выводу, что средняя движущая сила представляет собой среднюю логарифмическую разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{2,31 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} \quad (9.16)$$

На основании формулы (9.11) можно записать разность температур теплоносителей любого сечения теплообменного аппарата в следующем виде

$$\Delta t = \Delta t_H \cdot e^{-m \cdot k \cdot F_X}, \quad (9.17)$$

где F_X – поверхность теплообмена до рассматриваемого сечения (см. рисунок 9.1).

Уравнение (9.17) свидетельствует о том, что разность температур теплоносителей изменяется вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону. Уравнение (9.17) пригодно не только для прямотока, но и для противотока теплоносителей. Однако, если при прямотоке

$$m = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}, \text{ то при противотоке } m = \frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2}.$$

В инженерной практике часто требуется знать температуры теплоносителей в различных сечениях аппарата. Для решения этой задачи применительно к прямотоку допустим, что после омывания части поверхности F_X теплоносители имеют температуры t'_1 и t'_2 (см. рисунок 9.1). Запишем для этой части поверхности уравнение теплового баланса

$$Q_X = W_1 \cdot (t_{1H} - t'_1) = W_2 \cdot (t_{2H} - t'_2) \quad (9.18)$$

Составим разность $\Delta t_H - \Delta t$, учитывая формулу (9.17)

$$\Delta t_H - \Delta t = \Delta t_H - \Delta t_H \cdot e^{-m \cdot k \cdot F_X} = \Delta t_H \cdot (1 - e^{-m \cdot k \cdot F_X}) \quad (9.19)$$

С другой стороны, эта же разность температур определяется по температурам теплоносителей (см. рисунок 9.1)

$$\Delta t_H - \Delta t = (t_{1H} - t_{2H}) - (t'_1 - t'_2) = t_{1H} - t_{2H} - t'_1 + t'_2 \quad (9.20)$$

Приравнивая правые части (9.19) и (9.20), имеем:

$$(t_{1H} - t_{2H}) \cdot (1 - e^{-m \cdot k \cdot F_X}) = t_{1H} - t_{2H} - t'_1 + t'_2 \quad (9.21)$$

Решая совместно уравнения (9.18) и (9.20), получаем

$$t'_1 = t_{1H} - [(t_{1H} - t_{2H}) / m \cdot W_1] \cdot (1 - e^{-m \cdot k \cdot F_X}) \quad (9.22)$$

$$t'_2 = t_{2H} + [(t_{1H} - t_{2H}) / m \cdot W_2] \cdot (1 - e^{-m \cdot k \cdot F_X}) \quad (9.23)$$

Для определения конечных температур теплоносителей достаточно в формулы (9.22) и (9.23) подставить $F_X = F$. При противотоке конечные температуры теплоносителей можно определить по известным значениям W_1 , W_2 , t_{1H} , t_{2H} , K , воспользовавшись уравнением теплового баланса для всей поверхности теплопередачи

$$Q = W_1 \cdot (t_{1H} - t_{1K}) = W_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H}) \quad (9.24)$$

и уравнением (9.17), записанным в виде

$$t_{1K} - t_{2H} = (t_{1H} - t_{2K}) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F} \quad (9.25)$$

Совместное решение этих уравнений дает:

$$t_{1K} = t_{1H} - (t_{1H} - t_{2H}) \cdot \frac{1 - e^{-m \cdot k \cdot F}}{1 - (W_1/W_2) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}} \quad (9.26)$$

$$t_{2K} = t_{2H} + \frac{W_1}{W_2} (t_{1H} - t_{2H}) \cdot \frac{1 - e^{-m \cdot k \cdot F}}{1 - (W_1/W_2) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}} \quad (9.27)$$

Для определения температур теплоносителей в любом сечении теплообменного аппарата составляются уравнения, аналогичные уравнениям (9.24) и (9.25):

$$W_1 \cdot (t_{1H} - t'_1) = W_2 \cdot (t_{2K} - t'_2) \quad (9.28)$$

$$t'_1 - t'_2 = (t_{1H} - t_{2K}) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F_X} \quad (9.29)$$

Решая эти уравнения совместно с уравнением (9.26), получим:

$$t'_1 = t_{1H} - (t_{1H} - t_{2H}) \cdot \frac{1 - e^{-m \cdot k \cdot F_X}}{1 - (W_1/W_2)^{-m \cdot k \cdot F}} \quad (9.30)$$

После подстановки значения t'_1 в уравнения (9.28) и (9.29) и значения t_{2K} из формулы (9.27) имеем:

$$t'_2 = t_{1H} - (t_{1H} - t_{2H}) \cdot \frac{1 - (W_1/W_2) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F_X}}{1 - (W_1/W_2) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}} \quad (9.31)$$

Коэффициент регенерации. Во многих случаях по условиям технологического процесса жидкость нагревается до высокой температуры, а затем охлаждается до сравнительно низкой температуры (термообработка молока, вина, пива, бульонов и т.п.). Такой процесс экономически невыгоден. В целях экономии тепла и холода применяется их регенерация. Если горячую жидкость пропустить по одну сторону стенки, а холодную – по другую, то горячая жидкость охладится, а холодная нагреется и будет сэкономлено тепло для нагрева и холод для охлаждения той же жидкости. Для осуществления регенерации в теплообменную установку включается дополнительный поверхностный теплообменник, называемый регенератором. В принципе регенераторы могут работать как при прямотоке, так и противотоке теплоносителей.

Предположим, что рисунок 9.1 иллюстрирует стационарный процесс теплообмена в регенераторе. Часть тепла, которую отдает греющий агент (т.е. тепло регенерации), составляет

$$Q_P = W_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H}) \quad (9.32)$$

Если холодную жидкость необходимо нагреть от температуры t_{2H} до температуры t_{1H} , то при отсутствии регенерации расход тепла будет

$$Q = W_2 \cdot (t_{1H} - t_{2H}) \quad (9.33)$$

Отношение количества тепла, возвращенного горячей жидкостью холодной жидкости при регенерации, к общему количеству тепла, необходимому для нагрева холодной жидкости, называется коэффициентом регенерации

$$\xi = \frac{Q_P}{Q} = \frac{W_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H})}{W_2 \cdot (t_{1H} - t_{2H})} = \frac{t_{2K} - t_{2H}}{t_{1H} - t_{2H}} \quad (9.34)$$

Формула (9.34) пригодна для расчета коэффициента регенерации тепла, как при прямотоке, так и при противотоке теплоносителей.

Определим максимально возможные значения коэффициента ξ при условии, что водяные эквиваленты теплоносителей одинаковы, т.е. $W_1 = W_2$. При прямотоке величину t_{2K} в формуле (9.34) заменяем выражением (9.23) при $F_X = F$:

$$\xi = \frac{t_{2K} - t_{2H}}{t_{1H} - t_{2H}} = \frac{t_{2H} + [(t_{1H} - t_{2H})/m \cdot W_2](1 - e^{-m \cdot k \cdot F}) - t_{2H}}{t_{1H} - t_{2H}} = \frac{1 - e^{-m \cdot k \cdot F}}{m \cdot W_2} \quad (9.35)$$

Из формулы (9.35) видно, что при $W_1 = W_2$, в случае прямотока теплоносителей, максимально возможный коэффициент регенерации $\xi = 0,5$, однако в действительности он не превышает $\xi = 0,4$. Для противотока необходимо подставить формулу (9.27) в выражение коэффициента регенерации (9.34), принимая $F = \infty$:

$$\xi = \frac{t_{2K} - t_{2H}}{t_{1H} - t_{2H}} = \frac{t_{2H} + \frac{W_1}{W_2} \cdot (t_{1H} - t_{2H}) \cdot \frac{1 - e^{-m \cdot k \cdot F}}{1 - (W_1/W_2) \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}} - t_{2H}}{t_{1H} - t_{2H}} = \frac{W_1}{W_2} \quad (9.36)$$

Формула (9.36) свидетельствует о том, что для противотока теплоносителей при $W_1 = W_2$, максимально возможный коэффициент регенерации $\xi = 1$; однако в действительности он не превышает величины $\xi = 0,80 - 0,85$.

Выбор изоляции. Для понижения потерь тепла в окружающую среду и обеспечения нормальных санитарных условий в производственных помещениях наружные поверхности горячих стенок аппаратов покрывают одним или несколькими слоями теплоизоляционных материалов, обладающих низкими коэффициентами теплопроводности (менее $0,2 \text{ Вт/мК}$).

Коэффициенты теплопроводности изолирующих материалов уменьшаются с ростом их пористости (за счет низкой теплопроводности воздуха, содержащегося в порах), но возрастают с увеличением их влажности. Защита гигроскопических изолирующих материалов от увлажнения достигается на практике при помощи влагонепроницаемых покрытий (окраска, обшивка металлической фольгой и т.п.). При умеренных температурах

изолируемых поверхностей чаще всего обходятся нанесением на них одного слоя теплоизолирующего материала. Сильно нагретые стенки аппаратов покрываются несколькими последовательными слоями в порядке убывания допускаемой ими температуры. Очевидно, что наложение изоляции из любого материала на плоскую стенку всегда ведет к понижению потерь тепла, причем это понижение тем значительнее, чем толще изолирующий слой. Однако для цилиндрической стенки дело обстоит иначе, поскольку с увеличением толщины слоя изоляции возрастает поверхность теплообмена с окружающей средой. Следовательно, при неправильном выборе толщины изоляции потери тепла могут даже возрасти вследствие увеличения поверхности изолированного аппарата за счет увеличения его диаметра.

Из курса теплопередачи известно, что потери тепла в окружающую среду становятся максимальными в том случае, когда диаметр трубопровода (аппарата) равен т.н. критическому диаметру слоя изоляции, определяемому по формуле:

$$(D_2)_{кр} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}, \quad (9.37)$$

где $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи изолированной поверхности в окружающую среду.

Схема к расчету теплоизоляции показана на рисунок 9.2. Необходимо иметь в виду, что слой изоляции с диаметром D_2 ниже $(D_2)_{кр}$ своего назначения не оправдывает, поскольку в диапазоне от D' до $(D_2)_{кр}$ потери тепла увеличиваются (D' - диаметр неизолированного аппарата). Уменьшение тепловых потерь начинается только при $D_2 > (D_2)_{кр}$. Следовательно, можно сформулировать следующее требование, предъявляемое при выборе изоляции:

$$D_2 > \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2} \quad (9.38)$$

откуда

$$\lambda_{из} < \frac{\alpha_2 \cdot D_2}{2} \quad (9.39)$$

Формула (9.38) позволяет определить необходимую толщину изоляции по известному коэффициенту ее теплопроводности.

Формула (9.39) позволяет подобрать нужный теплоизоляционный материал, если лимитирована толщина слоя изоляции.

В данной работе предлагается определить распределение температур теплоносителей по длине теплообменного аппарата «труба в трубе», рассчитать коэффициент регенерации тепла при прямотоке и противотоке теплоносителей, произвести выбор необходимой теплоизоляции секций теплообменника.

Экспериментальная часть работы выполняется на теплообменной установке «труба в трубе», показанной на рисунке 8.2 в работе №8 (описание устройства установки также представлено в работе №8).

9.2 Методика выполнения работы

Перед началом каждого опыта все вентили на установке должны быть закрыты. Плавно открывают вентиль 3, после чего холодная вода начинает поступать в теплообменник. Затем по заданию преподавателя устанавливают определенный расход горячей воды (при прямотоке открывают вентили 8, 5 и 2; при противотоке открывают вентили 6, 7 и 2). Через 5-7 минут после установления постоянных расходов горячей и холодной воды теплообменник выйдет на стационарный режим работы, о чем судят по постоянству во времени температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменника. После этого следует снять показания всех контрольных приборов и занести их в таблицу 9.1. Опыт выполняют вначале при прямотоке теплоносителей, а затем, при их противотоке.

Таблица 9.1 – Опытные данные

Схема движения теплоносителей	Начальная температура горячей воды $t_{1н}$	Конечная температура горячей воды $t_{1к}$	Расход горячей воды G_1	Начальная температура холодной воды $t_{2н}$	Конечная температура холодной воды $t_{2к}$
Прямоток					
Противоток					

9.3 Обработка опытных данных

1. Определяют тепловой поток, Вт

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к}), \quad (9.40)$$

где c_1 – удельная теплоемкость горячей воды, Дж/(кг·К).

2. Из уравнения теплового баланса находят расход холодной воды, кг/с

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1н} - t_{1к})}{c_2 \cdot (t_{2к} - t_{2н})}, \quad (9.41)$$

где c_2 – удельная теплоемкость холодной воды, Дж/(кг·К).

3. Определяет среднюю логарифмическую разность температур, градус

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_m}}, \quad (9.42)$$

где $\Delta t_{\bar{o}}$ – разность температур теплоносителей на том конце теплообменника, где она больше;

Δt_m – разность температур теплоносителей на том конце теплообменника, где она меньше. (Подробнее о Δt_{cp} см. в работе №8).

4. Определяют коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$:

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}}, \quad (9.43)$$

где F – рабочая поверхность теплообменника, $м^2$.

5. Находят водяные эквиваленты

$$W_1 = c_1 \cdot G_1 \text{ и } W_2 = c_2 \cdot G_2 \quad (9.44)$$

6. Рассчитывают величину m (см. указания, приведенные в основах теории).
Результаты расчетов заносят в таблицу 9.2

Таблица 9.2 – Расчетные данные

Схема движения теплоносителей	Q	G_2	Δt_{cp}	K	c_1	c_2	W_1	W_2	m
Прямоток									
Противоток									

7. Определяют значения площадей поверхности теплообмена от входного сечения 0 - 0 до сечений I - I, II - II, III - III, показанных на рисунке 8.2 в работе №8. Указанные сечения выбраны таким образом, что между ними располагается одна секция теплообменника. Рабочая длина каждой секции равна 0,75 м. Трубы теплообменника имеют диаметр: наружные 25x2 мм, внутренние – 12x1,5 мм (первое число означает внешний диаметр трубы, второе – толщину стенки).

8. Воспользовавшись формулами (9.22), (9.23), (9.30), (9.31) и данными таблицы 9.2, определяют температуры горячей t'_1 и холодной t'_2 воды в различных сечениях теплообменника, а также движущую силу процесса Δt .

Результаты расчетов записывают в таблицу 9.3. По данным таблицы 9.3 строят графики $t'_1, t'_2 = f(F_X)$ и делают выводы.

Таблица 9.3 – Изменение температур теплоносителей и движущей силы по длине теплообменника

Обозначение сечения аппарата	F_X	Прямоток			Противоток		
		t'_1	t'_2	$\Delta t = t'_1 - t'_2$	t'_1	t'_2	$\Delta t = t'_1 - t'_2$
0 – 0							
I – I							
II – II							
III – III							

9. Рассчитывают коэффициент регенерации тепла по формуле (9.34), используя данные таблицы 9.1. Сравнивают значения коэффициентов регенерации для прямотока и противотока и делают выводы.

10. На основании формул (9.38) и (9.39) по заданию преподавателя производят либо выбор материала изоляции, либо расчет толщины изоляции. При этом коэффициент теплоотдачи α_2 при свободной конвекции от поверхности теплообменника к окружающему воздуху можно найти по приближенной формуле:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t \quad (9.45)$$

где Δt – разность температур поверхности аппарата и окружающего воздуха, градус

Контрольные вопросы

1. Что является движущей силой теплообменных процессов?
2. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопередачи, какова его размерность?
3. В каком случае применяется принцип противотока теплоносителей?
4. В каком случае (при прямотоке или противотоке) при прочих равных условиях больше расход теплоносителя?
5. В каком случае применяется принцип прямотока теплоносителей?
6. Как определяется средняя логарифмическая разность температур?
7. Как записывается уравнение теплового баланса при отсутствии изменения агрегатного состояния теплоносителем?
8. Что называется водяным эквивалентом?
9. По какому закону применяется по длине теплообменника разность температур теплоносителей?
10. Что называется коэффициентом регенерации тепла?
11. Для чего производится регенерация тепла в теплообменных установках?
12. Что называется критическим диаметром слоя теплоизоляции?
13. Назовите условие правильного выбора изоляции.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А.Г. Касаткин.- 9-е изд., испр. - М.: Химия, 1973. - 752 с.
2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии [Текст]/ Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. – М.: Колос, 1997 – 264 с.
3. Лунин О.Г. Теплообменные аппараты пищевых производств [Текст]/О.Г. Лунин, В.Н. Вельтищев – М.: Агропромиздат, 1987 – 239 с.
4. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств [Текст]/ под ред. проф. С.М. Гребенюка и доц. И.М. Михеевой. – М.: Агропромиздат, 1987 – 215 с.

10 Лабораторная работа № 10

Изучение тепловых процессов в пластинчатом теплообменном аппарате

Цель работы. Изучение устройства и принципа действия пластинчатого теплообменного аппарата. Экспериментальное определение коэффициента теплопередачи и гидравлического сопротивления пластинчатого аппарата при различных скоростях движения теплоносителей.

10.1 Теоретические основы

Пластинчатые теплообменники широко применяются в молочном, пивоваренном, винодельческом, консервном и других производствах для нагревания, охлаждения, пастеризации и стерилизации жидкостей. Поверхность теплообмена в данных аппаратах образуется из штампованных металлических пластин, устанавливаемых на горизонтальных шлангах. Рабочие поверхности пластин – рифленые (гофрированные), что придает им жесткость и обеспечивает турбулизацию протекающих по ним теплоносителей. Пластины зажимаются между неподвижной плитой и подвижной плитой посредством винтового зажима через резиновые прокладки. В собранном теплообменнике между рабочими поверхностями смежных пластин образуются каналы для теплоносителей; по четным каналам движется один теплоноситель, а по нечетным – другой, и теплообмен между ними происходит через стенку пластины. Каждая пластина имеет четыре отверстия. При сборке аппарата эти отверстия образуют четыре продольных коллектора. Все пластины в теплообменнике собираются в пакеты. Пакетом называют группу пластин и теплообмена в тонком слое коэффициент теплопередачи в пластинчатых аппаратах значительно выше, чем в других теплообменниках.

Теплопередача в пластинчатых аппаратах является сложным процессом, зависящим от многих факторов, среди которых наиболее важное место занимает: режим движения теплоносителей, форма, размеры, материал и толщина пластины, физические свойства теплоносителей и температурный напор.

Режим движения жидкости характеризуется критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d_{\text{э}}}{\nu} = \frac{v \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu}, \quad (10.1)$$

где v – средняя по сечению канала скорость потока, м/с;

ν – кинематический коэффициент вязкости теплоносителя при его средней температуре, m^2 / c ;

μ – динамический коэффициент вязкости теплоносителя при его средней температуре, $Па \cdot с$;

ρ – плотность теплоносителя при его средней температуре, $кг/м^3$;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала, м.

$$d_{\text{э}} = 4R = 4 \frac{f}{\Pi} = 2\delta, \quad (10.2)$$

где R – гидравлический радиус, м;

$f = B \cdot \delta$ – площадь поперечного сечения потока в одном канале, $м^2$;

B – ширина канала, м;

Π – длина смоченного периметра канала, м;

δ – минимальный зазор между поверхностями гофр, измеренный по нормали к их плоскостям, м.

Правила составления тепловых балансов, основное уравнение теплопередачи, температурные графики, формулы для расчета среднего температурного напора в поверхностных теплообменниках подробно приведены в работе 8 данного лабораторного практикума; в полной мере они применимы и для пластинчатых теплообменников.

Экспериментальные исследования работы пластинчатых теплообменников и обработка опытных данных показывают, что для ленточно-поточных пластин с горизонтальными гофрами треугольной формы пригодны следующие критериальные уравнения в диапазоне критериев Рейнольдса $100 < Re < 30000$

$$Nu = 0,10 \cdot Re^{0,7} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (10.3)$$

$$\xi = 11,2 \cdot Re^{-0,25}, \quad (10.4)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot d_{\text{э}}}{\lambda}$ – критерий Нуссельта;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр, м;

$Re = \frac{v \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

v – скорость движения теплоносителя, $м/с$;

ρ – плотность теплоносителя, $кг/м^3$;

μ – динамический коэффициент вязкости теплоносителя, $Па \cdot с$;

$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$ – критерий Прандтля теплоносителя при его средней

температуре;

Pr_{cm} – критерий Прандтля теплоносителя при температуре стенки;

c – удельная теплоемкость теплоносителя, $Дж/(кг \cdot K)$;

λ – теплопроводность теплоносителя, $Вт/(м \cdot K)$,

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления единицы относительной длины канала.

В данной работе предлагается определить, на основании проведенных опытов, коэффициент теплопередачи и гидравлическое сопротивление пластинчатого аппарата.

10.2 Описание установки

Работа проводится на установке (рисунок 10.1), состоящей из пластинчатого теплообменника 1, ротаметров 2 и коммуникационных трубопроводов подвода и отвода теплоносителей. Для измерения температуры теплоносителей на входе в аппарат и на выходе из него предусмотрены термопары и потенциометр (на рисунке не показаны). Дифференциальные манометры 3 и 4 служат для измерения гидравлического сопротивления аппарата по ходу горячего и холодного теплоносителя. Теплоносителями служат горячая и холодная вода.

Пластинчатый аппарат имеет две прижимные плиты, между которыми расположены пластины ленточно-поточного типа. Между пластинами, по их краю, помещаются резиновые прокладки, которые обеспечивают необходимый зазор между пластинами. Пластины аппарата образуют пакеты, в каждом из которых имеется по 8 параллельных каналов. Для каждого теплоносителя в аппарате имеется по 2 пакета пластин.

10.3 Методика проведения работы

Открывают подачу горячей и холодной воды и по указанию преподавателя последовательно устанавливают примерно 7-8 различных пар значений расходов V_1 и V_2 . Измерение расходов производят по ротаметрам с использованием их тарировочного графика, который помещен на щите установки. Измерение температур теплоносителей при любой паре расходов V_1 и V_2 можно производить только после выхода аппарата на стационарный режим работы, о чем судят по постоянству во времени температур теплоносителей на входе в аппарат и на выходе из него. Тарировочный график термпар для перевода показаний потенциометра из милливольт в градусы также расположен на щите установки. Для каждого режима аппарата по дифманометрам измеряют потери давления ΔP_1 и ΔP_2 по ходу горячей и по ходу холодной воды.

Все данные испытания заносят в таблицу 10.1.

По окончании опытов прекрывают подачу теплоносителей в аппарат.

Таблица 10.1 – Опытные данные

№ опыта	V_1 л/с	t_{1H} °С	t_{1K} °С	ΔP_1 Па	V_2 л/с	t_{2H} °С	t_{2K} °С	ΔP_2 Па
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

10.4 Обработка опытных данных

Обработку опытных данных проводят в следующей последовательности:

10.4.1 По образцу, имеющемуся в лаборатории, измеряют: ширину B , длину L , толщины $\delta_{ст}$ и смоченный периметр Π пластины. Определяют зазор δ между пластинами.

10.4.2 Подсчитывают площадь поверхности пластины в одном канале f_0 площадь живого сечения канала $f = B \cdot \delta$ и эквивалентный диаметр канала $d_{\text{э}} = \frac{4f}{\Pi}$.

10.4.3 Определяют количество тепла, отдаваемого в аппарате горячим теплоносителем $Q_1 = V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1H} - t_{1K})$ и принимаемого холодным теплоносителем $Q_2 = V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H})$. Путем сравнения численных значений величин Q_1 и Q_2 делают выводы о потерях тепла в окружающую среду. Необходимые здесь и далее теплофизические свойства теплоносителей нужно выбирать из справочников.

10.4.4 Определяют температурный напор (средне-логарифмический $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}}$ или среднеарифметический $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_m}{2}$ – см. работу 8) и

из основного уравнения теплопередачи $Q = K_1 \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$ рассчитывают коэффициент теплопередачи K_1 .

10.4.5 По уравнению расхода $V = W \cdot f$ определяют скорости движения теплоносителей v_1 и v_2 .

10.4.6 Воспользовавшись критериальным уравнением (10.3), находят критерии Нуссельта для горячего и холодного теплоносителей, а затем, исходя из их численных значений, рассчитывают коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_{\text{э}}}, \quad \alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{\text{э}}} \quad (10.5)$$

10.4.7 Рассчитывают коэффициент теплопередачи

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (10.6)$$

и значения K_2 сравнивают с соответствующими значениями K_1 .

10.4.8 По формуле (10.4) находят коэффициенты гидравлического сопротивления ξ_1 и ξ_2 , а затем рассчитывают потери давления ΔP_1 и ΔP_2 по ходу горячего и холодного теплоносителей:

$$\Delta P_1 = \xi_1 \cdot \frac{L_1}{d_{\text{э}}} \cdot \rho_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot X_1 \quad \text{и} \quad \Delta P_2 = \xi_2 \cdot \frac{L_2}{d_{\text{э}}} \cdot \rho_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \cdot X_2 \quad (10.7)$$

где L_1 и L_2 - длина канала в аппарате соответственно для горячего и холодного теплоносителей, м;

X_1 и X_2 - число пакетов в аппарате для горячего и холодного теплоносителей.

Измеренные в опытах и рассчитанные величины ΔP_1 и ΔP_2 сравнивают. Результаты расчетов записывают в таблицу 10.2.

Таблица 10.2 – Расчетные величины

№ опыта	v_1 м/с	v_2 м/с	Δt_{cp} град	ξ_1	ξ_2	ΔP_1 Па	ΔP_2 Па	Коэффициент теплопередачи $Bm / (m^2 \cdot K)$	
								K_1	K_2
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

В заключение строят графики зависимостей $K_1 = f_1(v_1)$, $K_2 = f_2(v_2)$, $\Delta P_1 = f_3(v_1)$, $\Delta P_2 = f_4(v_2)$.

После анализа данных графиков делают соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. Конструкция и принцип работы пластинчатого теплообменника.
2. Основное уравнение теплопередачи.
3. Что понимают под тепловой нагрузкой аппарата?
4. Как составляются уравнения тепловых балансов при нагревании и охлаждении теплоносителей?
5. Что понимают под средним температурным напором? Как рассчитывается средний температурный напор?
6. В чем заключается физический смысл коэффициента теплоотдачи? От чего зависит коэффициент теплоотдачи?
7. Какие критерии подобия используют при расчете коэффициента теплоотдачи? Каков физический смысл этих критериев?
8. В чем заключается физический смысл коэффициента теплопередачи?
9. Как рассчитываются потери напора в аппарате?
10. Какова зависимость потерь напора от скорости движения жидкостей в аппарате?
11. Для чего необходимо оценивать гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата?
12. Что называется пакетом пластин пластинчатого теплообменника?
13. Уравнение расхода жидкости в теплообменнике.

Список литературы

1. Коваленко Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи [Текст]/Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 240с.
2. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств [Текст]/В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985 – 503с.
3. Пластинчатые теплообменники (каталог). – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. – 1974. – 60 с.
4. Лунин О.Г. Теплообменные аппараты пищевых производств [Текст]/О.Г. Лунин, В.Н. Вельтищев – М.: Агропромиздат, 1987 – 239 с.

Приложение А

(справочное)

Таблица А.1 – Водяной пар в состоянии насыщения (по давлению)

$p \cdot 10^3$, Па	t , °С	i , кДж/кг	r , кДж/кг	i' , кДж/кг
32	70,62	2627,8	2332,2	295,55
34	72,03	2630,3	2328,8	301,48
36	73,37	2632,5	2325,4	307,12
38	74,66	2634,7	2322,2	312,5
40	75,89	2636,8	2319,2	317,65
42	77,06	2638,8	2316,2	322,6
44	78,19	2640,7	2313,3	327,36
46	79,28	2642,5	2310,5	331,95
48	80,33	2644,3	2308,9	335,35
50	81,35	2646,0	2305,4	340,57
55	83,74	2650,0	2299,4	350,61
60	85,95	2653,6	2293,7	359,93
65	88,02	2657,0	2288,4	368,62
70	89,96	2660,2	2283,4	376,77
75	91,78	2663,2	2278,8	384,45
80	93,51	2666,0	2274,3	391,72
85	95,14	2668,6	2270,0	398,63
90	96,71	2671,1	2265,9	405,21
95	98,20	2673,5	2262,0	411,49
100	99,63	2675,7	2258,2	417,51
110	102,32	2680,0	2251,2	428,84
120	104,81	2683,8	2244,4	439,36
130	107,13	2687,4	2238,2	449,19
140	109,32	2690,8	2234,4	458,42
150	111,37	2693,9	2226,8	467,13
160	113,32	2696,8	2221,4	475,38
170	115,17	2699,3	2216,3	483,22
180	116,93	2702,1	2211,4	490,70
190	118,62	2704,6	2206,8	497,85
200	120,23	2706,9	2202,2	504,70
210	121,78	2709,2	2197,9	511,30
220	123,27	2711,3	2193,7	517,60
230	124,71	2713,3	2189,6	523,70
240	126,09	2715,3	2185,7	529,60
250	127,43	2717,2	2181,8	535,40
260	128,73	2719,0	2178,1	540,90
270	129,98	2720,7	2174,5	546,20
280	131,20	2722,3	2170,9	551,40
290	132,39	2723,9	2167,4	556,50
300	133,54	2725,5	2164,1	561,40

Приложение Б

(справочное)

Таблица Б.1 – Физические параметры воды

$t, ^\circ\text{C}$	ρ , кг/м ³	i , кДж/кг	$c \cdot 10^3$, Дж/(кг*К)	$\lambda \cdot 10^{-2}$, Вт/(м*К)	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па*с	$\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	$\beta \cdot 10^{-4}$, 1/К	Pr
0	1000	0	4,23	55,1	1790	1,70	-0,63	13,7
10	1000	41,9	4,19	57,5	1310	1,31	+0,70	9,52
20	998	83,8	4,19	59,9	1000	1,01	1,82	7,02
30	996	126	4,18	61,8	804	0,81	3,21	5,42
40	992	168	4,18	63,4	657	0,66	3,87	4,31
50	988	210	4,18	64,8	549	0,556	4,49	3,54
60	983	251	4,18	65,9	470	0,478	5,11	2,98
70	978	293	4,19	66,8	406	0,415	5,70	2,55
80	972	335	4,19	67,6	355	0,365	6,32	2,21
90	965	376	4,19	68,0	314	0,326	6,95	1,95
100	958	419	4,23	68,2	283	0,295	7,52	1,75
120	943	502	4,27	68,5	238	0,252	8,84	1,47
140	926	590	4,27	68,5	201	0,217	9,72	1,26

Приложение В

(справочное)

Таблица В.1 – Психрометрическая таблица для определения относительной влажности воздуха ($v \geq 2,5 \text{ м/с}$)

$t_c - t_m$	Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	91	90	90	91	92	92	93	93	94	94	94	95	95	95	96	96	96	96
2	80	81	79	81	82	83	84	86	86	87	88	89	90	96	91	91	92	92
3	67	69	72	69	71	73	75	77	78	80	81	82	83	81	85	86	87	88
4	53	56	59	62	59	62	64	67	69	71	73	75	76	78	79	80	82	83
5	36	41	45	49	52	49	52	55	58	41	64	66	68	70	72	74	76	77
6	18	24	29	34	39	43	38	42	46	50	53	56	59	62	64	67	69	71
7		4	11	17	23	28	33	28	33	37	41	45	49	52	55	58	61	63
8					5	12	18	24	17	23	28	33	38	42	45	49	52	55
9							1	8	14	7	13	19	25	36	34	39	43	46
10												4	16	16	22	27	32	36
11														1	8	14	19	25
12																	6	12

Продолжение таблицы В.1

$t_c - t_m$	Температура сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$																	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	97	97	97	97	97	98	98	98	98	98	98	98	98	98	99	99	99	99
2	93	93	94	94	94	95	95	95	96	96	96	96	97	97	97	97	97	97
3	89	89	90	91	91	92	91	93	93	93	94	94	94	94	95	95	96	96
4	84	85	86	87	87	88	89	90	90	91	91	92	92	93	93	93	91	94
5	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	88	89	96	96	91	91	92	92
6	73	74	76	77	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	88	89	90	90
7	66	68	76	72	73	75	77	78	79	80	82	83	84	85	85	66	87	88
8	58	61	63	66	68	70	71	73	75	76	78	79	80	81	82	83	84	85
9	50	53	56	59	61	64	66	68	76	72	73	75	76	78	79	80	81	82
10	40	44	48	51	54	57	59	62	64	66	68	70	72	74	75	77	78	79
11	30	34	38	42	46	49	52	55	58	61	63	65	67	69	71	73	74	76
12	18	23	28	33	37	41	45	48	51	54	57	60	62	64	66	68	76	72
13	5	11	17	22	27	32	36	40	44	47	56	53	56	59	61	64	66	68
14			4	16	16	21	26	31	35	39	43	47	50	53	56	58	61	63
15					4	10	16	21	26	31	35	39	43	46	49	52	55	58
16							14	16	16	21	26	31	35	39	42	46	49	52
17									4	10	16	21	26	31	35	39	42	46
18											5	11	16	21	26	31	35	39
19													6	12	17	22	27	31
20															7	13	18	23

Продолжение таблицы В.1

$t_c - t_M$	Температура сухого термометра t_c , °C													
	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66
0,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,5	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1,0	94	94	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
1,5	91	91	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	93	93
2,0	88	89	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	91	91
2,5	85	86	87	87	87	87	87	87	87	87	88	88	88	88
3,0	82	83	84	84	84	84	84	84	85	85	86	86	86	86
3,5	79	80	81	81	81	81	82	82	83	83	83	84	84	84
4,0	77	78	79	79	79	79	80	80	81	81	81	82	82	82
4,5	74	75	76	76	76	76	78	78	79	79	79	80	80	80
5,0	71	72	73	74	74	74	75	76	77	77	77	78	78	78
6,0	66	67	68	69	70	70	71	72	73	73	73	74	74	75
7,0	62	62	63	64	65	66	67	68	69	69	70	70	71	71
8,0	55	58	59	60	61	62	63	64	65	65	66	67	67	68
9,0	52	53	54	55	56	58	59	60	60	61	61	62	63	63
10,0	48	49	50	51	52	54	55	56	57	58	58	59	60	61
11,0	44	45	46	47	48	50	51	52	53	54	55	56	57	57
12,0	40	42	43	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	54
13,0	36	38	39	41	42	44	45	46	47	48	49	50	51	52
14,0	32	35	36	38	39	41	42	43	44	45	46	47	48	49
15,0	29	31	33	34	36	37	38	39	41	42	43	44	45	46
16,0	25	28	30	31	33	34	36	37	38	39	40	41	42	43
17,0	23	25	27	28	30	31	33	34	35	36	37	38	39	40
18,0	19	22	24	25	27	29	30	32	33	34	35	36	37	38
19,0	17	19	21	22	24	26	27	29	30	31	32	33	34	35
20,0	14	16	18	20	22	24	25	27	28	29	30	31	32	33
21,0	11	13	16	17	19	21	22	24	25	27	28	29	30	31
22,0	8	11	13	15	17	19	20	22	23	25	26	27	28	29
23,0	—	—	10	12	14	16	10	20	21	22	24	25	26	27
24,0	—	—	8	10	12	14	16	18	19	20	22	23	24	25
25,0	—	—	—	—	10	12	14	16	17	18	20	21	22	22
26,0	—	—	—	—	8	10	12	14	15	17	18	19	20	22
27,0							10	12	13	15	16	17	18	20
28,0							8	10	12	13	14	16	17	18
29,0								8	10	11	12	14	15	16
30,0								7	8	9	11	13	14	15
32,0											9	10	11	12

Приложение Г

(справочное)

Таблица Г.1 – Плотность и коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(мК)
Асбест	600	0,151
Асбоцементные плиты	300	0,087
Асфальт	1800-2000	0,07-0,08
Бетон	1900-2200	0,9-1,3
Битум	950-1000	0,302-0,348
Бумажная изоляция	200-250	0,07-0,08
Стекловата	130	0,038
Вата минеральная	200	0,052-0,064
Войлок		
минеральный	200	0,064
строительный	160	0,046-0,058
Газобетон		
теплоизоляционный	400-600	0,110-0,6
Дерево	500-800	0,14-0,23
Железобетон	2200-2400	1,4-1,5
Земля и насыпи	1600-1800	0,7-0,93
Текстолит	1380	0,24
Цементная штукатурка	1800	0,99-1,16
Алюминий	2700	202
Кладка кирпичная		
обыкновенная	1700	0,696-0,812
Кладка из кирпича	1840	1,044
огнеупорного	600	0,116-0,2088
изоляционного	920	2,32
Лед	250-300	0,09-0,12
Опилки древесные		
Плиты		
пробковые	150-180	0,045-0,06
минераловатные	350	0,075
древесноволокнистые	400	0,054
Минеральная пробка	325	0,064
Пенопласт	30	0,0464
Рубероид	600-800	0,14-0,17
Бронза	8,000	63,8
Латунь	7500	92,8
Медь	8800	383
Сталь нержавеющая	7900	17,4
Чугун	7500	46,4-92,8

Приложение Д (справочное)

Таблица Д.1 – Энтальпия водно-спиртовых паров при температуре конденсации и давлении 10^5 Па

Содержание спирта в паре, % мас.	Температура конденсации, °С	Энтальпия жидкости i' , кДж/кг	Теплота испарения смеси r , кДж/кг	Энтальпия пара i , кДж/кг	Плотность пара ρ , кг/м ³
0	100	418,70	2256,7	2675	0,589
5	99,4	424,56	2185,6	2610	0,620
10	98,8	426,24	2114,4	2540	0,643
15	98,2	423,3	2043,0	2466,5	0,667
20	97,6	420,79	1972,1	2392,9	0,694
25	97,0	420,37	1902,9	2383,4	0,722
30	96,0	417,86	1833,9	2250,5	0,750
35	95,3	406,97	1762,7	2169,7	0,785
40	94,0	397,34	1691,5	2087,2	0,817
45	93,2	382,27	1624,5	2006,8	0,754
50	91,9	369,29	1553,4	1922,6	0,887
55	90,6	356,73	1484,3	1841,0	0,933
60	89,0	342,91	1415,2	1758,1	0,976
65	87,0	322,81	1346,0	1668,9	1,025
70	85,1	306,48	1277,0	1585,2	1,085
75	82,8	284,29	1210,0	1494,3	1,145
80	80,8	260,01	1143,0	1403,0	1,214
85	79,6	249,96	1071,8	1321,8	1,295
90	78,7	237,40	996,5	1233,9	1,380
95	78,2	222,74	925,3	1148,0	1,480
100	78,3	209,76	854,1	1063,9	1,598