

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Баламирзоев Назим Димитриевич
Должность: И.о. ректора
Дата подписания: 19.08.2023 03:27:10
Уникальный программный ключ:
2a04bb882d7edb7f479cb266eb4aaadebeea849

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования**

**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине "Тепловые процессы и аппараты пищевых производств" для подготовки магистров направления подготовки 19.04.02, профиль - «Процессы и аппараты пищевых производств»

Махачкала - 2021

УДК 664.002

Методические указания к лабораторным работам №№ 1-4 по дисциплине "Теплообменные процессы и аппараты пищевых производств" для магистрантов направления подготовки 19.04.02, профиль - «Процессы и аппараты пищевых производств»

Махачкала, ДГТУ, 2021 г.

В данных методических указаниях приведены методики выполнения лабораторных работ, которые выполняются по курсу "Теплообменные процессы и аппараты пищевых производств" согласно учебному плану, обработка экспериментальных данных и составление отчета.

Составители: д.т.н., доцент Ахмедов М.Э.
к.т.н., ст. преп. Абдулхаликов З.А.

Рецензенты: Ген. директор ГУП «Буйнакская база
МТС» Даудов А.М.

д.т.н., доцент кафедры
ТПиООП Демирова А.Ф.

Печатается по постановлению Совета Дагестанского государственного технического университета от “___” _____ 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к лабораторным работам по тепловым процессам и аппаратам пищевых производств включают описание работ, содержание и объем которых соответствуют учебной программе по дисциплине.

В каждой работе приводятся краткие сведения из теории, описание экспериментальной установки, указания по методике измерений, приемам обработки экспериментальных данных и оформлению отчета, контрольные вопросы.

Инструкция по технике безопасности при работе в лаборатории

1. К лабораторным занятиям в лаборатории допускаются студенты, получившие инструктаж по технике безопасности у руководителя занятий с соответствующим оформлением его в журнале.
2. Студентам запрещается самостоятельно включать электродвигатели насосов, открывать и закрывать задвижки трубопроводов и вентили, включать измерительные приборы и установки. Эти работы должны выполняться обслуживающим персоналом лаборатории; либо студентом, но под наблюдением руководителя лабораторных занятий.
3. Оборудование учебного зала лаборатории относится к разряду особо опасных в отношении поражения электротоком и поэтому студенты обязаны строго соблюдать правила техники безопасности (заземление установок, диэлектрические коврики), и должны уметь оказать первую помощь.
4. Окончив работу на установке, студент обязан поставить в известность об этом руководителя лабораторных занятий или обслуживающий персонал.

ПРАВИЛА выполнения лабораторных работ.

1. Лабораторные работы выполняются по предварительно составленному кафедрой графику.
2. До начала лабораторных занятий студент обязан ознакомиться с методическими указаниями к данной лабораторной работе, изучить соответствующие вопросы учебной программы по рекомендуемой литературе и составить бланк отчета. Студент допускается к выполнению лабораторной работы при условии сдачи в начале занятия коллоквиума по теоретическим вопросам и методике измерений.
3. Экспериментальная часть работы выполняется бригадой в составе 2-3 студентов под руководством преподавателя или старшего лаборанта.

Результаты измерений и наблюдений заносятся каждым студентом в бланк отчета и предъявляются преподавателю для визирования.

4. В конце лабораторного занятия студент должен сдать преподавателю и защитить законченный отчет по выполненной работе. Отчет составляется на стандартных листах бумаги (210x297), должен иметь титульный лист (форма титульного листа дана в приложении) и включать следующие разделы: цель работы; основные положения и расчетные зависимости; схема экспериментальной установки и методика проведения работы; результаты экспериментов (таблицы экспериментальных данных с результатами обработки и графики); анализ полученных результатов. Студент, защитивший отчет, получает зачет по лабораторной работе.
5. Студент, не допущенный к выполнению лабораторной работы, готовится в течение данного занятия и в конце занятия, после повторного опроса получает допуск к работе. Отработка невыполненной работы проводится по графику отработок во внеурочное время до начала следующего лабораторного занятия.
6. Студент, не получивший зачет по лабораторной работе, не допускается к выполнению следующей работы и обязан сдать зачет во внеурочное время до начала следующего занятия.
7. Студент, получивший зачет по всем лабораторным работам, в конце семестра автоматически получает зачет по всему лабораторному циклу дисциплины.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ “ТРУБА В ТРУБЕ”

Введение

Процесс передачи тепла между двумя теплоносителями, имеющими различные температуры, осуществляется в аппаратах – теплообменниках. Одним из таких аппаратов является теплообменник «труба в трубе», представляющий собой систему двух коаксиальных труб разных диаметров. По внутренней трубе проходит один теплоноситель, по кольцевому зазору между трубами – второй. Поток тепла при этом направлен поперек цилиндрической поверхности внутренней трубы.

Количество передаваемого в теплообменнике тепла может быть определено из уравнения теплопередачи:

$$Q = KF\Delta t_{cp} \quad (1)$$

где F — теплопередающая поверхность; Δt_{cp} - температурный напор, т. е. разность между температурами горячего и холодного теплоносителей, усредненная вдоль теплопередающей поверхности (длине теплообменника). Усреднение требуется в тех случаях, когда температура хотя бы одного теплоносителя изменяется при прохождении его вдоль теплообменника.

Можно показать, что независимо от взаимного направления движения теплоносителей:

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

где Δt_{δ} и Δt_{μ} — соответственно большая и меньшая разности температур между теплоносителями на концах теплообменника.

Коэффициент теплопередачи K по физическому смыслу является термической проводимостью того пути, по которому тепло передается от горячего теплоносителя к холодному. Вдоль этого пути обычно выделяются следующие термические сопротивления: 1) сопротивление при переходе тепла от основной массы (потока) первого теплоносителя к поверхности трубы ($1/\alpha_1$, где α_1 — коэффициент теплоотдачи или термическая проводимость ламинарного пристенного слоя); 2) термическое сопротивление слоя загрязнений на стенке трубы (накипь, ржавчина); 3) термическое сопротивление собственно стенки трубы ($\delta_{ст}/\lambda_{ст}$ — толщина стенки, $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности материала трубы); 4) термическое сопротивление загрязнений на стенке трубы со стороны второго теплоносителя; 5) термическое сопротивление ламинарного слоя при переходе тепла от наружной стенки трубы к основной массе второго теплоносителя. Так как все перечисленные сопротивления проходятся тепловым потоком последовательно, то общее термическое сопротивление

системы равно сумме отдельных сопротивлений, а проводимость, как всегда, есть величина, обратная сопротивлению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum r_{зап} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3)$$

Естественно, что общая проводимость K всегда меньше любой частной проводимости.

Определение коэффициентов теплоотдачи является одной из основных задач теории теплообмена. В настоящее время коэффициенты теплоотдачи рассчитываются из критериальных уравнений, в которых сам вид обобщенных безразмерных переменных (критериев подобия) определяется теоретически на основе теории подобия, а явный вид зависимости между критериями находится экспериментально для каждого вида теплообмена.

В данной установке холодная вода проходит по внутренней трубе и нагревается насыщенным водяным паром, поступающим в кольцевое пространство и конденсирующимся на наружной поверхности внутренней трубки.

При пленочной конденсации чистого насыщенного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубы может быть определен по формуле Нуссельта:

$$Nu = 0,72(GaPrK)^{0,25}(Pr/Pr_{ст1})$$

где $Nu = \frac{\alpha_1 d}{\lambda_k}$ - критерий Нуссельта (безразмерная форма представления

коэффициента теплоотдачи); $Ga = \frac{gd^3\rho^2}{\mu^2}$, $Pr = \frac{\mu \cdot c_k}{\lambda_k}$, $K = \frac{r}{c_{ic}(t_n - t_{cm})}$ — критерии

Галилея, Прандтля и фазового превращения. Здесь d — диаметр трубы; ρ , c , g , λ_k , μ — соответственно плотность, теплоемкость, скрытая теплота конденсации, а также коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости конденсата; t_n и $t_{ст}$ — температуры насыщенного пара и стенки трубы, на которой происходит конденсация; в критерии $Pr_{ст}$ физические константы берутся при $t_{ст1}$.

Если удельный тепловой поток на стенку является известной величиной, критериальное соотношение [3] можно привести к упрощенному виду:

$$\alpha_1 = 2,03\lambda_k \sqrt[3]{\frac{\rho^2 L}{\mu D}} \sqrt[3]{\frac{Pr}{Pr_{cm1}}} \quad (4)$$

где L — длина трубы; D — расход конденсирующегося пара.

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к турбулентному вынужденному потоку жидкости дается в зависимости от критерия Рейнольдса ($Re = \frac{wd\rho}{\mu}$) и физических свойств жидкости (Pr и $Pr_{ст}$). При $Re > 10^4$, коэффициент теплоотдачи можно определить из уравнения:

$$Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0.8} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm1}} \right), \quad (5)$$

где ε_l - поправочный коэффициент, учитывающий возмущающее воздействие входного участка трубы (при $L/d \geq 50$ $\varepsilon_l = 1$); w – средняя по сечению трубы скорость жидкости.

Цель работы — экспериментальное определение коэффициента теплопередачи K в теплообменнике; расчет термического сопротивления загрязнений стенки; сравнение тепловой проводимости загрязнений стенки с коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи.

Описание установки (рис. 1)

Греющий пар подают в межтрубное кольцевое пространство теплообменника 3. Конденсат отводится через конденсатоотводчик 8 в линию конденсата. Воду подают во внутреннюю трубу теплообменника. Расход воды устанавливают при помощи расходомера — ротаметра 10.

Давление конденсирующегося пара регулируют вентилем по показанию манометра 4, присоединенного к средней части теплообменника. Температуру воды до и после теплообменника измеряют ртутными термометрами 2.

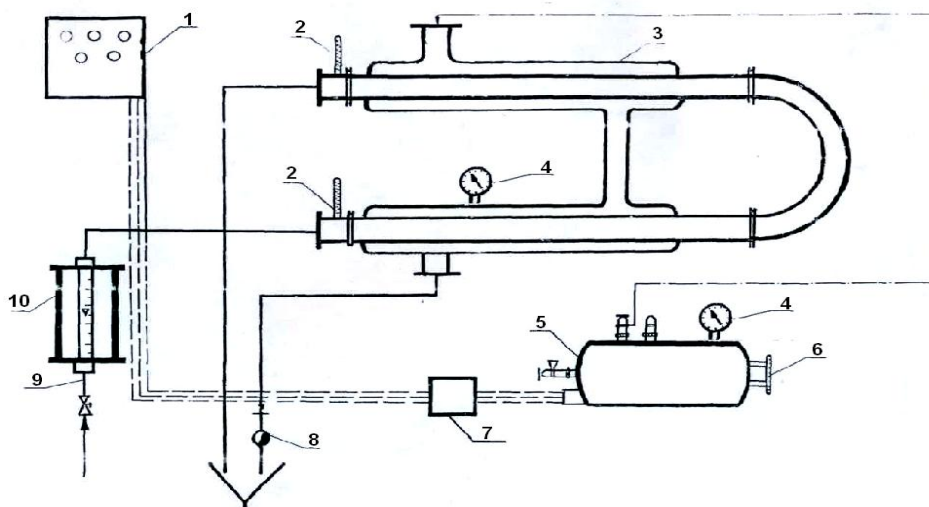


Рис. 1. Теплообменник труба в трубе

1 – щит управления; 2 – термометр; 3 – теплообменник; 4 – манометр; 5 – термостат; 6 – водомер; 7 – терморегулятор; 8 – конденсатоотводчик; 9 – водопровод; 10 – ротаметр.

Методика проведения работы

При пуске установки устанавливают примерный расход воды (по шкале ротаметра) и только затем продувают паром межтрубное (кольцевое) пространство теплообменника в течение 5—10 мин. После продувки устанавливают заданный расход воды и постоянное (избыточное) давление пара ($0,3 \div 0,5$ ат). Работают на установившемся режиме. Через каждые 2 мин

записывают показания термометров 5. Замеры заканчивают, когда начальная и конечная температуры воды примут постоянные значения.

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Величину коэффициента теплопередачи вычисляют по формуле (1). При этом среднюю разность температур $\Delta t_{\text{ср}}$ определяют из формулы (2) по измеренным температурам воды (t_n и t_k) и взятой по таблицам свойств насыщенного водяного пара, в зависимости от давления при температуре насыщенного пара t_n . Количество тепла, переданное от пара к воде, находят из теплового баланса:

$$Q = M_v C_v (t_k - t_n)$$

где Q - количество воспринятого водой тепла, Вт; M_v - расход воды, кг/с; C_v - теплоемкость воды, Дж/(кг • град); t_n и t_k - начальная и конечная температуры воды.

При этом теплоемкость воды определяют при ее средней температуре $t_{\text{ср.в}} = t_n - \Delta t_{\text{ср}}$. Последний способ определения $t_{\text{ср.в}}$ учитывает то обстоятельство, что температура воды при прохождении ее вдоль греющей поверхности возрастает не линейно, а экспоненциально.

2. Величину термического сопротивления загрязнений на стенке теплопередающей трубы $\sum \Gamma_{\text{загр}}$ находят из выражения для коэффициента теплопередачи (3). Для этого необходимо вычислить значения коэффициентов теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи от пара к наружной стенке α определяется по формуле (4). Значения физических констант берутся при температуре пара t_n . Расход пара находится из теплового баланса для пара $Q = D r_x$ [где r — удельная теплота конденсации (в Дж/кг) и x — степень сухости пара принимается равной 0,9 (90%)]. Так как температура стенки $t_{\text{ст1}}$ заранее не известна, то в качестве первого приближения при вычислении α_1 принимается $Pr/Pr_{\text{ст1}} = 1$. После этого, во втором приближении определяется значение $t_{\text{ст1}}$ из выражения для теплового потока от пара к стенке:

$$\frac{Q}{F} = \alpha'_1 (t_n - t_{\text{ст1}})$$

где F - теплопередающая поверхность, м²; α'_1 - приближенное значение коэффициента теплоотдачи, определенное из формулы (4) при $Pr/Pr_{\text{ст1}} = 1$, Вт/(м² • град).

Вычисляется значение $R_{\text{ст1}}$ при полученной температуре наружной поверхности стенки $t_{\text{ст1}}$. Наконец, вычисляется более точное значение α_1 по соотношению (4).

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к воде определяют по соотношению (5). Значения физических констант берутся при средней температуре воды $t_{\text{ср.в}}$. Здесь также заранее неизвестна температура стенки $t_{\text{ст2}}$ и приходится прибегать к методу последовательных приближений.

Последовательно полагается $R_{\Gamma}/R_{\Gamma_{\text{ст}2}}=1$ и рассчитывается первое приближение [в Вт/(м² • град)] из полученного по формуле (5) значения критерия Нуссельта. Далее определяется температура поверхности трубы со стороны жидкости $t_{\text{ст}2}$ из выражения для потока тепла от стенки к жидкости:

$$\frac{Q}{F} = \alpha'_2 (t_{\text{ст}2} - t_{\text{ср}})$$

После этого уточняется значение коэффициента теплоотдачи α_2 по формуле (5).

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- а) схему установки,
- б) таблицу измеренных величин,
- в) полный расчет искомых величин.

Отчетная таблица

- Задание: 1. Расход воды: показание ротаметра.....делений
 $M_{\text{в}}.....\text{кг/с}$
 2. Давление греющего пара $P_{\text{изб}}.....\text{Па}$
 3. Температура конденсации пара $t_{\text{п}}.....^{\circ}\text{C}$
 1. Начальная температура воды $^{\circ}\text{C}$
 2. Конечная температура воды $^{\circ}\text{C}$.

Таблица вычисляемых величин

№ п/п	Наименование величины	Расчетная формула	Результат
1	Разность температур на концах теплообменника	$\Delta t_{\delta} = t_n - t_h$ $\Delta t_m = t_n - t_k$	$\Delta t_{\delta} =$ $\Delta t_m =$
2	Средняя разность температур в теплообменнике	$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}}$	$\Delta t_{cp} =$
3	Средняя температура жидкости	$t_{cp} = t_n - \Delta t_{cp}$	$t_{cp} =$
4	Расход тепла	$Q = M_{\text{г}} C_{\text{г}} (t_k - t_n)$	$Q =$
5	Коэффициент теплопередачи	$K = \frac{Q}{F \Delta t_{cp}} = \frac{q}{\Delta t_{cp}}$	$K =$
6	Расход греющего пара	$D_n = \frac{Q}{i_n - i_k}$	$D_n =$
7	α_1	$\alpha'_1 = 1,284 \sqrt{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu \cdot \Delta t \cdot d}}$ $Q/F = \alpha'_1 (t_n - t_{cm1}^l)$	$\alpha_1 =$ $t_{\text{ст}1} =$
8	Pr по $t_{\text{п}}$ для конденсата	Приложение	Pr =
9	Pr _{ст1} по $t_{\text{ст}1}$	Приложение	Pr _{ст1} =

10	Определение Re Pr по t_n для жидкости N'_u α_2 $t_{ст2}$ Pr_{ст2} по $t_{ст2}$ α_2	$Re = \frac{Wd\rho}{\mu}$ Приложение $N'_u = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$ $\alpha'_2 = \frac{N'_u \lambda}{\alpha}$ $Q/F = \alpha'_2 (t_{cm2} - t_{cp})$ Приложение $\alpha_2 = \alpha'^2_2 \sqrt{\frac{Pr_1}{Pr_{cm2}}}$	Re = Pr = $N'_u =$ $\alpha_2 =$ $t_{ст2} =$ Pr_{ст2} = $\alpha_2 =$
11	$\Sigma r_{загр}$	$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_2}$	$\Sigma r_{загр} =$

Контрольные вопросы:

1. Что такое теплообменник?
2. Объясните принцип работы теплообменника типа "труба в трубе".
3. Объясните уравнение теплопередачи.
4. Как изменится коэффициент теплоотдачи жидкости к стенке при изменении ее скорости?
5. Как определить температуру стенки поверхности теплообменника?
6. Чему равен коэффициент теплоотдачи, объясните его смысл?

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ ПЕРЕГОННОГО КУБА

Простая перегонка осуществляется в установке с перегонным кубом. В процессе простой перегонки при испарении жидкости в пар переходит больше низкокипящего компонента, а его содержание в оставшейся жидкости уменьшается. Таким образом, по мере протекания процесса температура кипения жидкости повышается, а образующийся пар будет содержать все меньше и меньше низкокипящего компонента и, следовательно, состав дистиллята из этого пара по содержанию низкокипящего компонента с течением времени будет изменяться. Поэтому для сбора дистиллята разного состава, стекающего из конденсатора, устанавливают несколько приемников, которые соединяют с конденсатором поочередно в ходе процесса.

Практически простая перегонка сводится к непрерывному повторению процессов однократного испарения и конденсации пара, причем каждый раз состав жидкости по низкокипящему компоненту ухудшается, температура кипения повышается, и содержание низкокипящего компонента в дистилляте уменьшается, приближаясь к содержанию его в исходной смеси.

Простая перегонка применяется в том случае, когда не требуется очень полное разделение смеси, и когда температуры кипения компонентов сильно различаются.

Для составления уравнения материального баланса простой перегонки примем, что в кубе в некоторый момент времени τ содержится L кг перегоняемой смеси, имеющей текущую концентрацию x . Количество низкокипящего компонента в жидкости будет Lx .

Пусть за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ испарится dL кг смеси и концентрация жидкости в кубе уменьшится на величину dx . При этом образуется dI кг пара, равновесного с жидкостью и имеющего концентрацию y^* . Тогда материальный баланс по низкокипящему компоненту выразится уравнением

$$Lx = (L - dL)(x - dx) + dLy^*,$$

Пренебрегая произведением $dLdx$, получим

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{y^* - x}$$

Проинтегрировав выражение в пределах изменения количества жидкости в кубе от начального $L=F$ до конечного $L=W$ и соответствующего падения ее концентрации от x_f до x_w за всю операцию перегонки,

$$\int_W^F \frac{dL}{L} = \int_{x_w}^{x_f} \frac{dx}{y^* - x}.$$

В результате получим

$$\ln \frac{F}{W} = \int_{x_w}^{x_f} \frac{dx}{y^* - x}.$$

Цель работы:

1. Изучение процесса простой перегонки;
2. Экспериментальное определение состава и количества дистиллята и кубового остатка;
3. Сравнение результатов испытания с расчетными данными.

Описание экспериментальной установки

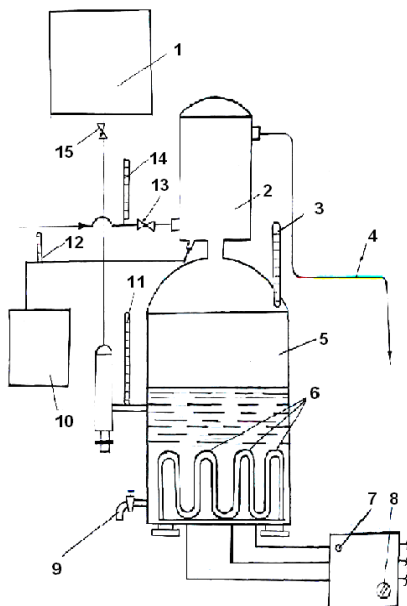


Рис. 1. Схема установки для простой перегонки

1- напорный бак; 2- конденсатор; 3, 12, 14- термометры; 4- вывод горячей воды; 5- перегонный куб; 6- электронагреватели; 7- сигнальная лампа; 8-выключатель; 9- кран для пуска кубового остатка; 10- сборник дистиллята; 11- мерное стекло; 13- кран подачи холодной воды; 15- кран подачи исходной смеси

Изучение процесса проводят на установке (рис. 1), состоящей из перегонного куба 2, в который заливают порцию исходной смеси, подвергающейся разделению.

Нагревание смеси в кубе в течение процесса производят электрическим элементом (тэн) 8.

Образующийся при кипении смеси пар отводится из куба в холодильник-конденсатор 3. Проходя по змеевику холодильника, пар конденсируется за счет отдачи теплоты протекающей в корпусе охлаждающей воде. Полученный дистиллят охлаждают до определенной температуры, которую измеряют термометром 15.

Дистиллят непрерывно стекает в сборник (Отбирают не менее четырех проб).

Методика проведения испытания

Для приготовления подлежащей разделению начальной смеси из этилового спирта и воды определенного состава (по массе) берут 40 % спирта ($x_H = 0,4$) и 60 % воды. Готовую смесь заливают в перегонный куб. Количество залитой смеси G_H определяют по водомерному стеклу напорного бака.

При известном составе начальной смеси по низкокипящему компоненту ($x_H = 0,4$) находят температуру кипения смеси $t_{кип 0}$ (по таблице).

Открывают вентиль 4 на трубопроводе охлаждающей воды у холодильника-конденсатора.

В тэн куба подают электричество. С этого момента ведут наблюдение за температурой смеси в кубе по термометру 3. Момент достижения найденной температуры кипения $t_{\text{кип}}$ 0, т. е. начало кипения смеси, считается началом испытания. От начала испытания через каждые 10 мин производят следующие замеры: температуру кипения смеси в кубе $t_{\text{кип}}$ по термометру 13; количество образующегося дистиллята $G_{\text{д}}$ в мерниках; температуру дистиллята $t_{\text{д}}$ по термометру 15.

Через каждые 10 мин от начала испытания отбирают также пробы из остатка в кубе через кран 9. Определяют содержание спирта в пробах кубового остатка и дистиллята, т. е. состав кубового остатка $x_{\text{к}}$ и состав дистиллята $x_{\text{д}}$ по спирту.

Испытание продолжают до тех пор, пока состав кубового остатка по спирту не достигнет заданного значения, например $x_{\text{к}}=5\%$. Полученные данные записывают в протокол испытания № 1.

По окончании испытания установку выключают и определяют количество кубового остатка $G_{\text{к}}$.

Обработка результатов испытания

Для определения количества и состава дистиллята и кубового остатка используют уравнение

$$\ln \frac{G_{\text{н}}}{G_{\text{к}}} = \int_{x_{\text{к}}}^{x_{\text{н}}} dx / (y - x),$$

где $G_{\text{н}}$ — количество начальной смеси, кг; $G_{\text{к}}$ — количество кубового остатка, кг; $x_{\text{н}}$ и $x_{\text{к}}$ — массовая доля спирта в начальной смеси и кубовом остатке, %; x и y — массовые доли спирта в жидкости и в равновесном паре над этой жидкостью, %.

Аналитически решить уравнение невозможно, так как неизвестна зависимость y от x , поэтому применяют графический метод определения интеграла. Для этого на миллиметровой бумаге в определенном масштабе строят график зависимости $1/(y - x)$ от x для смеси спирт—вода (рис. 2) по приложению.

[illegible]

3									
4									
		$\tau_{\text{общ}}$	$t_{\text{кип}}^{\text{cp}}$				$P_{\text{н.д.}}^{\text{cp}}$	$G_{\text{д}}^{\text{общ}}$	$t_{\text{д}}^{\text{cp}}$

При известном составе кубового остатка определяют количество спирта в нем (кг)

$$G_{\text{сп.к}}^{\text{T}} = G_{\text{к}}^{\text{T}} X_{\text{к}}$$

Количество дистиллята (кг)

$$G_{\text{д}}^{\text{T}} = G_{\text{н}} - G_{\text{н}}^{\text{T}}$$

Количество спирта в дистилляте (кг)

$$G_{\text{сп.д}}^{\text{T}} = G_{\text{сп.н}} - G_{\text{сп.к}}^{\text{T}}$$

где $G_{\text{сп.н}}^{\text{T}}$ — количество спирта в начальной смеси (кг)

$$G_{\text{сп.н}}^{\text{T}} = G_{\text{н}} X_{\text{н}},$$

$G_{\text{сп.к}}^{\text{T}}$ — рассчитанное (теоретическое) количество спирта в кубовом остатке, кг.

Состав дистиллята по спирту (%)

$$x_{\text{д}}^{\text{T}} = \frac{G_{\text{сп.д}}^{\text{T}}}{G_{\text{д}}^{\text{T}}} \cdot 100$$

На основании данных протокола испытания № 2 находят количество спирта в дистилляте

$$G_{\text{сп.д}} = G_{\text{д}}^{\text{общ}} X_{\text{д}}$$

Результаты аналитического расчета и данные испытания записывают в протокол № 2 и находят расхождение (%).

Протокол № 2

Показатели	Количество кубового остатка	Количество дистиллята	Состав дистиллята	Количество спирта в дистилляте
Данные аналитического расчета (теоретические)				

Данные испытания				
Расхождения, %				

Контрольные вопросы:

1. На чем основан процесс перегонки?
2. В чем сущность и назначение процесса перегонки?
3. Что называют дистиллятом и кубовым остатком?
4. Между какими величинами дается зависимость на кривой равновесия?
5. Между какими величинами дается зависимость на диаграмме температур?
6. Как по диаграмме температур поясняется основной принцип перегонки?
7. В чем сущность процесса простой перегонки?
8. В чем заключается недостаток процесса простой перегонки?
9. В каких случаях целесообразно применять простую перегонку?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Наиболее широко применяется конвективная сушка нагретым влажным воздухом, который является одновременно теплопередачиком и влагопоглотителем и называется сушильным агентом.

Цель работы:

1. Изучение процесса конвективной сушки материалов.
2. Построение по результатам испытания кривых сушки и скорости сушки.
3. Анализ периодов процесса сушки на основании построенных кривых.

Описание экспериментальной установки

Процесс конвективной сушки проводят в циркуляционной сушилке (рис. 1).

Сушилка состоит из сушильной камеры 1, калорифера 6, весов 2, шибера 4, вентилятора 5, термометра 3.

Свежий воздух из помещения засасывается вентилятором 5 через электрический калорифер 6. В середине верхнего канала расположена сушильная камера 1, в которую помещают подготовленный материал

для сушки. Материал помещают в кассету, соединенную стержнем через отверстие в корпусе сушилки с чашкой весов 2. Таким образом, в процессе сушки можно наблюдать непрерывно за изменением массы материала. Для более точного определения убыли влаги при сушке можно использовать весы большей точности. Отработанный воздух после сушильной камеры может быть полностью удален или направлен на рециркуляцию в смеси со свежим воздухом. Регулирование расхода воздуха осуществляется с помощью шиберов 4.

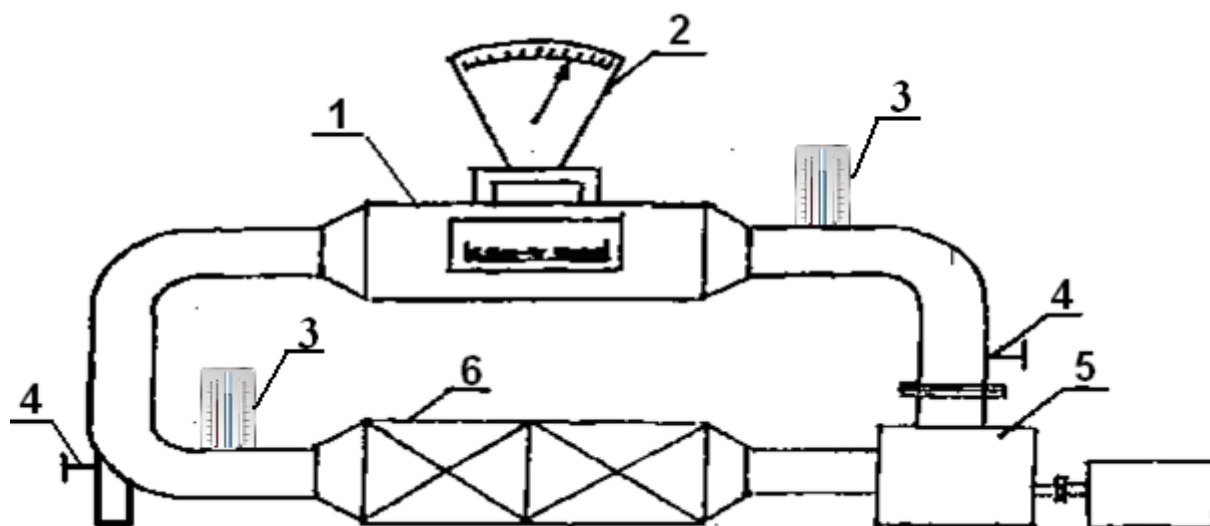


Рис. 1. Схема конвективной сушильной установки

Методика проведения испытания

Перед началом испытания готовят образцы. Из этих же образцов в два бюкса (масса бюксов определяется заранее) берут пробы (навески по 4—5 г) для определения начальной влажности. Бюксы с пробами взвешивают и ставят на 40 мин в сушильный шкаф, температура в котором при помощи терморегулятора поддерживается равной 130°C.

После этого бюксы вынимают из шкафа и вновь взвешивают. Результаты взвешивания бюксов записывают в протокол № 1.

Протокол №1

Бюкс с	Масса навески, г	Масса навески до сушки, г	Масса навески после сушки, г	Масса навески до сушки, г	Масса навески после сушки, г	Масса влаги в навеске до сушки, г	Влажность навески w_0^c , % к массе СВ	Средняя влажность материала $w_{0\text{ср}}^c$, % к массе СВ
	q_0	q'_1	q'_2	q_1	q_2	$q_{\text{вл}}$		

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Установку готовят к испытанию: включают сначала вентилятор, затем калорифер, устанавливают заданный расход воздуха. Установка считается готовой к испытанию, когда в ней обеспечивается стационарный режим, т. е. достигаются определенные температура и влажность воздуха до рабочей камеры.

Приготовленный образец взвешивают на технических весах, определяя массу влажного материала G_1 . Образец кускового материала вставляют в кассету, которую быстро подвешивают к тяге весов в рабочей камере сушилки. Образец должен быть расположен вертикально или параллельно потоку воздуха. Момент помещения материала в сушильную камеру является началом процесса сушки, т. е. началом испытания (время начала регистрируется в протоколе № 2).

Протокол №2

Объект сушки

Масса влажного образца G_1

Начальная влажность материала w_o^c

Сухая масса образца G_c

№ п/п	Время между замерами Δt , мин	Убыль массы ΔG , г	Масса образца G , г	Масса влаги $G_{вл}$, г	Влажность образца w_o^c , %	Температура воздуха перед сушильной камерой, $^{\circ}C$

Одновременно с регистрацией убыли массы образца в течение всего испытания измеряют температуру воздуха перед сушильной камерой t_c .

Испытание продолжают до тех пор, пока практически не прекратится убыль массы образца материала. Все данные испытания (замеры) записывают в протокол № 2.

По окончании испытания образец вынимают из сушилки, берут пробу для определения конечной влажности, выключают калорифер и вентилятор.

Обработка результатов испытания

Определение начальной влажности материала. Этот параметр определяют для навесок в каждом бюксе W_o^c' и W_o^c'' по данным протокола № 1 и по формуле (1)

$$W_o^c = \frac{q_{вл}}{q_c} \cdot 100, \quad (1)$$

где $g_{вл}$ — масса влаги в навеске, г; g_2 — масса навески после сушки до постоянной массы, г.

По найденной для каждой навески влажности W_{01}^c и W_{02}^c определяют среднюю начальную влажность W_{0cp}^c материала (%)

$$W_{0cp}^c = \frac{W_{01}^c + W_{02}^c}{2}$$

Определение сухой массы образца. Этот параметр (г) вычисляют по формуле

$$G_c = \frac{G_1}{1 + W_{0cp}^c / 100}$$

где G_1 — начальная масса влажного материала, г.

Определение влажности материала в процессе сушки. Влажность (%) определяют для каждого n-го замера по формуле

$$W_n^c = \frac{G_{вт}}{G_c} \cdot 100 \quad (2)$$

Для этого, используя данные расчета и протокола № 2, для каждого момента времени (для каждого замера) предварительно определяют:

$$\Delta G_1 = G_{n-1} - G_n$$

где G_n - масса образца в данный момент, г; G_{n-1} - масса образца в момент предыдущего замера, г; ΔG_1 - убыль массы между замерами, г; масса влаги в образце $G_{вл\ n}$

$$G_{вл\ n} = G_n - G_c$$

Построение кривой сушки. Кривую сушки, дающую графическую зависимость между влажностью материала и временем, строят на миллиметровой бумаге по данным протокола № 2 (рис. 2).

По оси абсцисс откладывают в определенном масштабе время от начала испытания τ (ч), а по оси ординат — влажность материала W (%).

Экспериментальные точки соединяют плавной линией, которая и будет кривой сушки. На кривой сушки находится критическая точка "к", которая делит весь процесс на периоды постоянной и падающей скорости сушки.

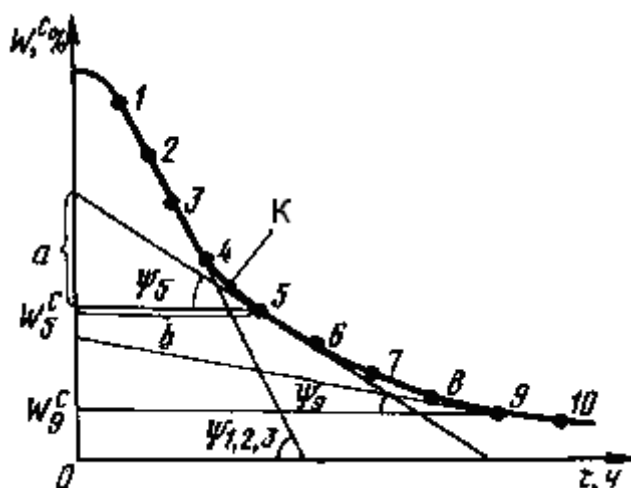


Рис. 2. Кривая сушки и схема графического дифференцирования

Построение кривой скорости сушки. Ее строят методом графического дифференцирования кривой сушки. На кривой сушки намечают несколько точек (от 10 до 15), для которых будет определена скорость сушки. Через каждую точку проводят касательную к кривой и определяют тангенс угла наклона каждой касательной. Например, для точки 5 $\text{tg } \varphi_5 = a/b$ (где a — величина отрезка на оси ординат; b — величина отрезка вдоль оси абсцисс).

Найденные таким образом тангенсы углов наклона касательных во всех точках имеют размерность $\%/ч$ и показывают изменение влажности материала за единицу времени (dW^c/dt), т.е. соответствуют скорости сушки в этих точках при определенной влажности (для точки 5 при влажности - W_5^c , для точки 9 — при влажности W_9^c и т.д.).

Для точек 1, 2, 3, лежащих на прямой, тангенсы угла наклона одинаковы. Это свидетельствует о том, что точки лежат в периоде постоянной скорости сушки. Для последующих точек тангенсы уменьшаются, следовательно, процесс сушки происходит с убывающей скоростью. Значения скорости сушки, найденные как тангенсы угла наклона касательных, записывают в протокол испытания № 3.

Протокол №3

Параметр	Номер точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Влажность в точках W^c , %										
Скорость сушки dW^c/dt , $\%/ч$										

По данным протокола № 3 на миллиметровой бумаге строят кривую скорости сушки $dW/dt = f(W^c)$. По оси ординат откладывают скорость сушки

(%/ч), а по оси абсцисс — влажность материала (%). На этом графике также отмечают критическую точку, соответствующую ей критическую влажность $W_{к1}$ и два периода сушки.

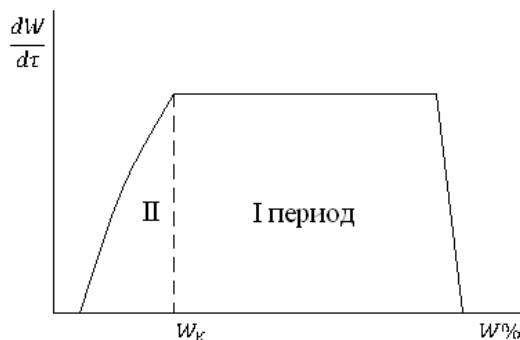


Рис. 3. Кривая скорости сушки.

Контрольные вопросы:

1. Дайте характеристику конвективной сушки.
2. Как строится кривая сушки?
3. Как строится кривая скорости сушки?
4. В чем заключается метод графического дифференцирования?
5. Дайте анализ кривых сушки и скорости сушки.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ИНФРАКРАСНЫМИ ЛУЧАМИ

Терморadiационная сушка инфракрасными лучами — прогрессивный способ обезвоживания влажных материалов и продуктов. Инфракрасное (невидимое) излучение имеет ту же физическую природу, что и световое излучение, — это электромагнитные колебания, но с разной длиной волны. К видимому свету относятся излучения с длиной волны от 0,38 до 0,77 мкм, а к инфракрасной области электромагнитного спектра — от 0,77 до 340 мкм.

В качестве генераторов инфракрасного излучения применяют специальные зеркальные лампы (температура нити около 2200—2500 К), кварцевые трубки (температура нити около 2500 К), электронагревательные элементы сопротивления (температура поверхности 873—1173 К) и газовые горелки инфракрасного излучения, в которых происходит беспламенное сжигание газа (температура поверхности 1073—1173 К).

Электромагнитное излучение в инфракрасной области обусловлено переходом электронов в атомах генератора излучения с одних орбит на другие, в результате чего выделяются кванты энергии (фотоны).

Применение инфракрасного излучения значительно интенсифицирует многие технологические процессы — сушку, выпечку, обжарку, полимеризацию и др. — вследствие значительного увеличения плотности теплового потока на поверхности облучаемого материала и проникновения инфракрасных лучей внутрь материала. Инфракрасные лучи пробегают путь от генератора излучения до объекта облучения в миллионные доли секунды и, не встречая сопротивления пограничного слоя, что наблюдается при конвективной сушке, обеспечивают эффективное нагревание материала за счет интенсификации движения атомов и молекул в его поверхностных и глубже расположенных слоях.

В зависимости от свойств облучаемого материала и температуры излучателя, от которой зависит длина волны, инфракрасные лучи способны проникать в толщу материала. Согласно закону Вина, при повышении температуры излучателя длина волны максимума энергии излучения уменьшается:

$$\lambda = 2886/T \quad (8)$$

где λ — длина волны максимума излучения, мкм; T — температура генератора излучения, К.

Экспериментально показано, что для многих пищевых продуктов с уменьшением длины волны глубина проникновения в материал увеличивается. Проницаемость материала зависит от многих факторов: структуры, оптических и терморadiационных характеристик его поверхности, влагосодержания и форм связи влаги в материале, пористости материала и т.д.

Для пищевых продуктов глубина проникновения коротковолновых инфракрасных лучей составляет 1—7 мм и достигает 12 мм и более (пшеничный хлеб). Чем глубже расположен слой, тем меньше доля лучистой энергии, проникающей в него; приближенно можно принять, что пропускание энергии излучения подчиняется экспоненциальной зависимости

$$T_{\lambda} = T_0 e^{-b_{\lambda} x} \quad (9)$$

где T_{λ} — проницаемость слоя, %; T_0 — доля лучистой энергии, воспринятой поверхностью материала, % ($T_0 = 1 - R_0$), где R_0 — величина, учитывающая отражение лучей поверхностью материала); e — основание натурального логарифма; b_{λ} — коэффициент ослабления лучей (коэффициент экстинкции), м; x — глубина расположения (толщина) слоя, м.

Значительная плотность теплового потока на поверхности материала, а также проникновение инфракрасных лучей в материал существенно влияют на его температурное поле в процессе сушки.

Температурное поле материала при инфракрасном облучении зависит от проницаемости материала, его толщины и температуры среды в рабочей камере.

В том случае, когда температура среды t_c ниже температуры поверхности материала t_n , который характеризуется сравнительно высокой теплопроводностью, увеличение скорости движения воздуха вызывает снижение скорости сушки в первом периоде за счет более интенсивной теплоотдачи с поверхности материала. Характер кривых скорости сушки во втором периоде зависит от свойств и размеров материала, а также от режима облучения.

Эффективность сушки часто повышается при применении осциллирующего режима — прерывистого облучения и комбинированного терморadiационно-конвективного метода. Прерывистое облучение дает значительный эффект как в отношении сокращения продолжительности процесса и расхода энергии, так и в части повышения качества продуктов при сушке толстых термолабильных материалов, в которых создаются высокие градиенты температуры. На процесс сушки, как типичный необратимый процесс, решающее влияние оказывает начальный импульс внешнего воздействия на влажный материал. Эффективность осциллирующего режима можно рассматривать как воздействие суммы начальных импульсов.

Применение комбинированных способов сушки с использованием инфракрасного излучения весьма перспективно для широкого внедрения в пищевую промышленность.

Цель работы:

1. Изучение процесса инфракрасной сушки кусковых материалов.
2. Построение по результатам испытания кривых сушки и скорости сушки.
3. Анализ периодов процесса сушки на основании построенных кривых.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из сушильной камеры 1, инфракрасных ламп 4, сетчатой полки 3, на которую помещается продукт. Инфракрасные лампы расположены сверху и снизу исследуемого продукта. Они закреплены на планке 2, которую можно передвигать, увеличивая или уменьшая расстояние между инфракрасными лампами и продуктом. Излучатели включаются в электрическую сеть через ЛАТР 5, с помощью которого регулируют накал нити ламп и соответственно нагрев материала. Электрический ток к ЛАТРу подается от стабилизатора напряжения 6. Вентилятор 7 служит для обдувки высушиваемого продукта воздухом.

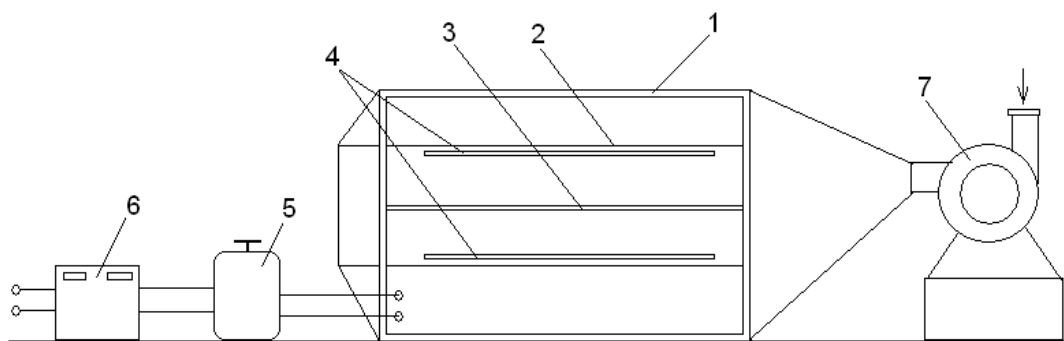


Рис. 2. Схема инфракрасной сушильной установки
1 – сушильная камера, 2 – передвигающаяся планка, 3 – сетчатая полка, 4 – инфракрасные лампы, 5 – ЛАТР, 6 – стабилизатор напряжения, 7 – вентилятор.

Методика проведения испытания

Объектом сушки может являться хлеб, сыпучий материал (зерно) или плодовоовощное сырье (яблоки, морковь и др.)

Перед началом испытания готовят образцы: к примеру, из буханки вырезают ломтик хлеба толщиной 7—10 мм. Из этих же образцов в два бюкса (масса бюксов определяется заранее) берут пробы (навески по 4—5 г) для определения начальной влажности. Бюксы с пробами взвешивают и ставят на 40 мин в сушильный шкаф, температура в котором при помощи терморегулятора поддерживается равной 130°C.

После этого бюксы вынимают из шкафа и вновь взвешивают. Результаты взвешивания бюксов записывают в протокол № 1.

Протокол №1

Бюкс	Масса бюкса, q_6 , г	Масса навески с бюксом до сушки, q'_1 , г	Масса навески с бюксом после сушки, q'_2 , г	Масса навески до сушки, q_1 , г	Масса навески после сушки, q_2 , г	Масса влаги в навеске до сушки, $q_{вл}$, г	Влажность навески w_o^c , % к массе СВ	Средняя влажность материала w_o^c , % к массе СВ

Установку готовят к испытанию: включают сначала вентилятор, затем инфракрасные лампы, устанавливают заданный расход воздуха.

Исследуемый продукт, если это необходимо, нужно промыть, инспектировать и очистить, нарезать на дольки или бруски толщиной 5÷10 мм. Определяют массу материала G_1 . Включают инфракрасные излучатели в электрическую сеть через ЛАТР, с помощью которого регулируют накал нити ламп. Лампы устанавливают на расстоянии 15÷25 см от высушиваемого

материала. После этого включают вентилятор и устанавливают заданный расход воздуха. Затем образцы кускового материала раскладывают на сетчатую полку. Момент помещения материала в сушильную камеру является началом процесса сушки, т. е. началом испытания (время начала регистрируется в протоколе № 2).

Протокол №2

Объект сушки

Масса влажного образца G_1

Начальная влажность материала w_o^c

Сухая масса образца G_c

№ п/п	Время между замерами Δt , мин	Убыль массы ΔG , г	Масса образца G , г	Масса влаги $G_{вл}$, г	Влажность образца w_o^c , %	Температура воздуха в сушильной камере, $^{\circ}C$

Количество удаляемой влаги определяют на технических весах через каждые 5-10 мин. Одновременно с регистрацией убыли массы образца в течение всего испытания измеряют температуру воздуха в сушильной камере t_c .

Испытание продолжают до тех пор, пока практически не прекратится убыль массы образца материала. Все данные испытания (замеры) записывают в протокол № 2.

По окончании испытания образец вынимают из сушилки, берут пробу для определения конечной влажности, выключают лампы и вентилятор.

Обработка результатов испытания

Определение начальной влажности материала. Этот параметр определяют для навесок в каждом бюксе W_o^c и W_o^c по данным протокола № 1 и по формуле (1)

$$W_o^c = \frac{q_{вл}}{q_c} \cdot 100, \quad (10)$$

где $g_{вл}$ — масса влаги в навеске, г; g_2 — масса навески после сушки до постоянной массы, г.

По найденной для каждой навески влажности W_{o1}^c и W_{o2}^c определяют среднюю начальную влажность $W_{o\text{ср}}^c$ материала (%)

$$W_{o\text{ср}}^c = \frac{W_{o1}^c + W_{o2}^c}{2} \quad (11)$$

Определение сухой массы образца. Этот параметр (в г) вычисляют по формуле

$$G_c = \frac{G_1}{1 + W_{o\text{cp}}^c / 100} \quad (12)$$

где G_1 — начальная масса влажного материала, г.

Определение влажности материала в процессе сушки. Влажность (%) определяют для каждого n-го замера по формуле

$$W_n^c = \frac{G_{\text{вл}}}{G_c} \cdot 100 \quad (13)$$

Для этого, используя данные расчета и протокола № 2, для каждого момента времени (для каждого замера) предварительно определяют:

$$\Delta G_1 = G_{n-1} - G_n \quad (14)$$

где G_n - масса образца в данный момент, г; G_{n-1} - масса образца в момент предыдущего замера, г; ΔG_1 - убыль массы между замерами, г; масса влаги в образце $G_{\text{вл } n}$

$$G_{\text{вл } n} = G_n - G_c \quad (15)$$

Построение кривой сушки. Кривую сушки, дающую графическую зависимость между влажностью материала и временем, строят на миллиметровой бумаге по данным протокола № 2 (рис. 3).

По оси абсцисс откладывают в определенном масштабе время от начала испытания τ (ч), а по оси ординат — влажность материала W (%).

Экспериментальные точки соединяют плавной линией, которая и будет кривой сушки. На кривой сушки находится критическая точка "к", которая делит весь процесс на периоды постоянной и падающей скорости сушки.

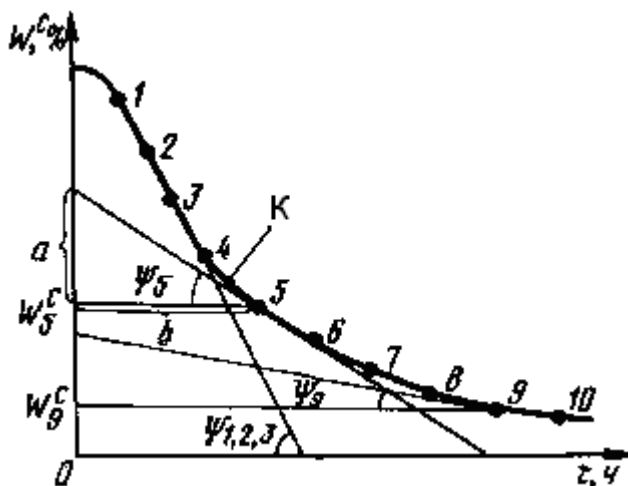


Рис. 3. Кривая сушки и схема графического дифференцирования

Построение кривой скорости сушки. Ее строят методом графического дифференцирования кривой сушки. На кривой сушки намечают несколько точек (от 10 до 15), для которых будет определена скорость сушки. Через каждую точку проводят касательную к кривой и определяют тангенс угла наклона каждой касательной. Например, для точки 5 $\operatorname{tg} \varphi_5 = a/b$ (где a — величина отрезка на оси ординат; b — величина отрезка вдоль оси абсцисс).

Найденные таким образом тангенсы углов наклона касательных во всех точках имеют размерность $\%/ч$ и показывают изменение влажности материала за единицу времени ($dW^c/d\tau$), т.е. соответствуют скорости сушки в этих точках при определенной влажности (для точки 5 при влажности - W_5^c , для точки 9 — при влажности W_9^c и т.д.).

Для точек 1, 2, 3, лежащих на прямой, тангенсы угла наклона одинаковы. Это свидетельствует о том, что точки лежат в периоде постоянной скорости сушки. Для последующих точек тангенсы уменьшаются, следовательно, процесс сушки происходит с убывающей скоростью. Значения скорости сушки, найденные как тангенсы угла наклона касательных, записывают в протокол испытания № 3.

Протокол №3

Параметр	Номер точки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Влажность в точках W^c , %										
Скорость сушки $dW^c/d\tau$, $\%/ч$										

По данным протокола № 3 на миллиметровой бумаге строят кривую скорости сушки $dW/d\tau = f(W^c)$. По оси ординат откладывают скорость сушки ($\%/ч$), а по оси абсцисс — влажность материала (%). На этом графике также отмечают критическую точку, соответствующую ей критическую влажность $W_{к1}^c$ и два периода сушки.

Контрольные вопросы:

1. Дайте характеристику инфракрасной сушки.
2. Как строится кривая сушки?
3. Как строится кривая скорости сушки?
4. В чем заключается метод графического дифференцирования?
5. Дайте анализ кривых сушки и скорости сушки.

Литература