

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Кафедра энергетики теплотехнологии

**ТЕРМОВЛАЖНОСТНЫЕ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ  
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов  
направления бакалавриата 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника  
профиля подготовки "Энергетика теплотехнологии"

Белгород 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г.ШУХОВА»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Кафедра энергетики теплотехнологии

Утверждено  
научно-методическим советом  
университета

**ТЕРМОВЛАЖНОСТНЫЕ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ  
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов  
направления бакалавриата 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника  
профиля подготовки "Энергетика теплотехнологии"

УДК 621.1 (075)  
ББК 38.113 Я 7  
Т 35

Составители: В.В. Губарева, доц.  
Рецензент П.А. Трубаев, д.т.н., доц.

**Термовлажностные** и низкотемпературные теплотехнологические  
Т35 процессы и установки: методические указания к выполнению лабора-  
торных работ. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014– 51с.

Методические указания содержат практическое руководство к выпол-  
нению лабораторных работ по основным разделам курса  
“Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические  
процессы и установки”.

Методические указания предназначены для студентов  
направления бакалавриата 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника  
профиля подготовки “Энергетика теплотехнологии”

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 621.1 (075)  
ББК 38.113 Я 7

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им В.Г. Шухова, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи методических указаний к лабораторным работам по дисциплине «Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки» определяются теми требованиями, которые предъявляет современная промышленность к инженерам-энергетикам теплотехнологий. Прежде всего, необходимо практически ознакомить студентов с основными типами аппаратов: теплообменниками, сушилками, выпарными установками, пропарочными камерами. Необходимо обеспечить детальное изучение типовых теплотехнологических процессов, показать взаимную связь отдельных параметров и влияние различных факторов на течение процессов, т. е. познакомить студентов с методами научного исследования в области термовлажностных и низкотемпературных процессов.

Кроме того, необходимо дать студентам возможность получить навыки самостоятельного обслуживания, управления, настройки заданного режима отдельных аппаратов и установок.

Развитие навыков самостоятельного критического подхода к решению технических вопросов является одной из основных задач лаборатории термовлажностных и низкотемпературных теплотехнологических процессов и установок. Поэтому выполнению лабораторных работ предшествует самостоятельное ознакомление с аппаратурой установки, задачей работы, а иногда и теоретический расчет, который потом сравнивается с экспериментальными данными.

## ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Прежде чем приступить к пуску учебной лабораторной установки, необходимо изучить содержание работы. Для этого студентам следует ознакомиться с основными теоретическими положениями, задачей, поставленной перед ними в данной работе, а также со схемой установки и оборудованием. Ответив на вопросы (включая вопросы по технике безопасности) и получив разрешение преподавателя, студенты включают установку и приступают к необходимым замерам и записям показаний контрольно-измерительных приборов в соответствии с полученным заданием.

Без разрешения преподавателя студентам категорически запрещается включать установки.

Отчет по лабораторной работе должен включать формулировку ее цели, схему установки и основные результаты работы в виде таблиц и графиков. В отчете следует привести расчетные формулы и пример расчета на одном экспериментальном режиме.

Все расчеты необходимо выполнять в Международной системе единиц измерения (СИ). Экспериментальные данные следует вписывать в таблицу в единицах, указанных на шкале прибора, а затем переводить в единицы СИ. Подготовка к защите лабораторных работ включает в себя изучение лекционного материала и учебников по данным темам.

### Лабораторная работа №1

## Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике " труба в трубе "

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией рекуперативного теплообменника "труба в трубе", составить тепловой баланс и установить зависимость коэффициента теплопередачи от скорости холодного теплоносителя.

Процесс передачи теплоты от одного теплоносителя другому осуществляется в аппаратах, называемых теплообменниками. В зависимости от способа передачи теплоты различают две основные группы теплообменных аппаратов: 1) поверхностные, в которых передача теплоты между теплоносителями происходит через разделяющую их поверхность – поверхность теплообмена; 2) теплообменники смешения (контактные), в которых теплота от одного теплоносителя передается другому при их непосредственном соприкосновении.

Поверхностные теплообменники делят на рекуперативные и регенеративные. В промышленности значительно реже рекуперативных теплообменников применяется регенеративные, в которых теплообмен между теп-

носителями осуществляется в результате попеременного омывания ими установленной в аппарате насадки.

Широкое распространение получили поверхностные теплообменные аппараты, в частности теплообменники с трубчатой теплообменной поверхностью. Трубчатые теплообменные аппараты по своей конструкции подразделяются на змеевиковые, кожухотрубные и типа "труба в трубе".

Поверхностный рекуперативный теплообменник "труба в трубе" состоит из ряда последовательных элементов, образуемых двумя соосными трубами разных диаметров. Один из теплоносителей движется по внутренней трубе, другой – в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубой. Стенка внутренней трубы, разделяющая теплоносители, является поверхностью теплообмена.

В данной работе изучается процесс передачи теплоты от горячей воды (которая проходит по внутренней трубе) к холодной воде.

Уравнение теплового баланса теплообменника имеет следующий вид:

$$Q_I = Q_2 + Q_{\text{П}}, \quad (1.1)$$

или

$$G_1 C_1 (t_{1H} - t_{1K}) = G_2 C_2 (t_{2K} - t_{2H}) + Q_{\text{П}}, \quad (1.2)$$

где  $Q_I$  – количество теплоты, отданное горячим теплоносителем за единицу времени, Вт;  $Q_2$  – количество теплоты, полученное холодным теплоносителем за единицу времени, Вт;  $Q_{\text{П}}$  – потери теплоты в окружающую среду за единицу времени, Вт;  $G_1$  и  $G_2$  – расходы соответственно горячего и холодного теплоносителя, кг/с;  $C_1$  и  $C_2$  – средние удельные теплоемкости соответственно горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·°С);  $t_{1H}$  и  $t_{1K}$  – соответственно начальная и конечная температуры горячего теплоносителя, °С;  $t_{2H}$  и  $t_{2K}$  – соответственно начальная и конечная температуры холодного теплоносителя, °С.

Тепловой поток  $Q$ , Вт, через поверхность теплопередачи при стационарном режиме определяется по основному уравнению теплопередачи:

$$Q = KS \Delta t_{cp}, \quad (1.3)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $S$  – поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор, °С.

Средний температурный напор  $\Delta t_{cp}$  процесса является средней движущей силой процесса теплопередачи и определяется теоретическими уравнениями:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left( \frac{t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}}}{t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}}} \right)} \quad \text{при } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}} > 2; \quad (1.4)$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{2} \quad \text{при } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}} < 2, \quad (1.5)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_m$  – соответственно большая и меньшая разность температур между теплоносителями на концах теплообменника. При противотоке  $\Delta t_m = t_{1K} - t_{2H}$ ,  $\Delta t = t_{1H} - t_{1K}$ .

Теплопередача представляет собой сложный процесс, включающий теплоотдачу от более нагретого теплоносителя к стенке, передачу теплоты путем теплопроводности через разделяющую стенку и теплоотдачу от стенки менее нагретому теплоносителю. Если трубы считать плоскими, что допустимо, когда толщина стенки мала по сравнению с диаметром, то коэффициент теплопередачи  $K$ , характеризующий интенсивность процесса теплопередачи, рассчитывают по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \sum r_{загр} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.6)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от более нагретой жидкости стенке, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к менее нагретой жидкости, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta_{cm}$  – толщина разделяющей стенки, м<sup>2</sup>;  $\delta_{загр}$  – толщина загрязнений (накипи, ржавчины и т. п.), м;  $\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·°С);  $\sum r_{загр}$  – термическое сопротивление загрязнений с обеих сторон стенки, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

Значения коэффициентов теплопроводности стенки  $\lambda_{cm}$  и загрязнений  $\lambda_{загр}$  находят по справочникам.

Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) определяются из критерия Нуссельта

$$\alpha = \frac{Nu_{ж} \cdot \lambda_{ж}}{d_3}, \quad (1.7)$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности жидкости;  $d_3$  – эквивалентный диаметр канала, по которому движется жидкость.

Критерий Нуссельта вычисляется для течения в прямых трубах или продольного течения по кольцевому каналу по соответствующему критериальному уравнению в зависимости от режима движения теплоносителя. Для турбулентного движения жидкости это сравнение имеет следующий вид:

$$Nu = 0,021 \varepsilon_l Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент теплоотдачи отношения длины трубы  $l$  к ее диаметру (при  $l/d > 50$   $\varepsilon_l = 1$ );  $Re = \nu d_3 \rho / \mu$  – критерий Рейнольдса;  $Pr = c\mu / \lambda$  – критерий Прандтля, вычисленный при средней температуре жидкости;  $Pr_{cm}$  – критерий Прандтля, вычисленный при средней температуре стенки;  $\nu$  – скорость жидкости, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,

Па·с;  $d_э$  – эквивалентный диаметр, м. Если температуры стенки и жидкости не сильно отличаются, то множитель  $(Pr/Pr_{cm})^{0,25}$ , учитывающий направление теплового потока, близок к 1.

### Описание лабораторной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.1. Теплообменник "труба в трубе" состоит из двух секций, образованных внутренней трубой 1 диаметром 10х1,5 мм и наружными трубами 2 диаметром 20х2 мм, соединенных патрубками. Термостат 3 служит для нагрева воды электронагревателями до температуры, задаваемой с помощью контактного термометра 4. Насос, установленный в термостате, перемещает нагретую дистиллированную воду по внутренней трубе теплообменника в количестве 55 мл/с; охлажденная вода возвращается в термостат.

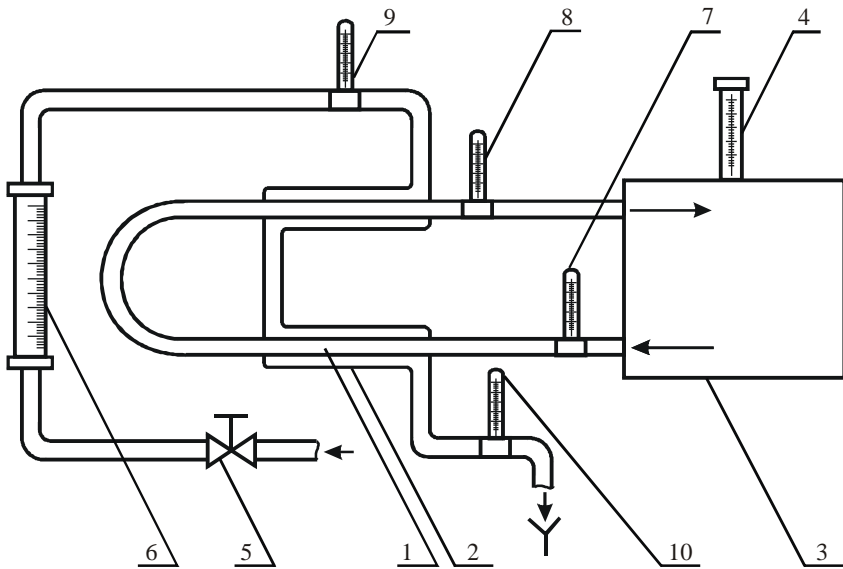


Рис. 4.1. Схема теплообменной установки типа «труба в трубе»: 1 – внутренняя труба; 2 – наружная труба; 3 – термостат; 4 – контактный термометр; 5 – вентиль холодной воды; 6 – ротаметр; 7, 8, 9, 10 – термометры

Температура горячей воды на входе в теплообменник и выходе из него измеряется термометрами 7 и 8. Через вентиль 5 в кольцевое пространство теплообменника подается холодная водопроводная вода. Ее расход измеряют с помощью ротаметра 6. Цена одного деления ротаметра соответст-



ет расходу 0,14 мл/с. Температура холодной воды на входе и выходе измеряется термометрами 9 и 10.

### Порядок проведения эксперимента

1. Наполняют термостат водой, включают электронагреватель и насос, доводят температуру воды до заданной величины.
2. Устанавливают с помощью вентиля заданный расход холодной воды.
3. По достижении стационарного режима работы теплообменника (через 10...16 мин после начала опыта) снимают показания термометров 7...10 и показания ротаметра 6.
4. Увеличивают расход холодной воды до второй заданной величины и после стабилизации режима работы теплообменника снимают показания приборов 6, 7...10.
5. Устанавливают третью заданную величину расхода холодной воды и снимают показания тех же приборов при стационарном режиме.
6. Выключают электронагреватель и насос термостата, закрывают вентиль 5.
7. Результаты эксперимента заносят в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ опыта	Показания ротаметра	Температура, °С			
		$t_{1H}$	$t_{1K}$	$t_{2H}$	$t_{2K}$

### Обработка результатов эксперимента

1. Составляют тепловой баланс и определяют потери в окружающую среду по уравнению (1.2), для чего необходимо:
  - а) определить средние температуры горячего и холодного теплоносителей для трех режимов;
  - б) найти средние удельные теплоемкости теплоносителей.
2. Определить действительный коэффициент теплопередачи  $K$  для трех режимов по формуле (1.3), для чего необходимо:
  - а) определить поверхность теплообмена, используя средний диаметр внутренней трубы;
  - б) по формуле (1.4) или (1.5) определить средний температурный напор;
  - в) тепловой поток  $Q_1$  через поверхность теплообмена рассчитывают, полагая, что он равен количеству теплоты  $Q_2$ , полученному холодной водой за единицу времени.

3. Вычисляют теоретический коэффициент теплопередачи  $K_T$  для трех режимов по формуле (1.6), для чего необходимо:

а) вычислить площадь поперечного сечения внутренней трубы и площадь кольцевого сечения между внутренней и наружной трубой;

б) из уравнения расхода определить скорости горячего  $v_1$  и холодного теплоносителя  $v_2$  для трех режимов;

в) по формуле (1.7) определить коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке ( $\alpha_1$ ) и от стенки к холодному теплоносителю ( $\alpha_2$ ), используя формулу (4.8);

г) по средней температуре стенки определить коэффициент теплопроводности стенки и величину термического сопротивления загрязнений по справочным таблицам [4].

4. Результаты расчетов сводят в таблицу (см. табл. 1.2).

5. Строят графики зависимостей  $\alpha_2 = f(v_2)$ ;  $K = f(v_2)$ ,  $K_T = f(v_2)$ .

Таблица 1.2

Параметр	Номер опыта		
	1	2	3
Массовый расход горячего теплоносителя $G_1$ , кг/с			
Массовый расход холодного теплоносителя $G_2$ , кг/с			
Скорость горячего теплоносителя $v_1$ , м/с			
Скорость холодного теплоносителя $v_2$ , м/с			
Средний температурный напор $\Delta t_{cp}$ , $^{\circ}\text{C}$			
Тепловые потоки, Вт : $Q_1$ $Q_2$ $Q_3$			
Коэффициенты теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ $\alpha_1$ $\alpha_2$			
Действительный коэффициент теплопередачи $K$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$			
Теоретический коэффициент теплопередачи $K_T$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$			

### Контрольные вопросы

1. Какими условиями определяется стационарный и нестационарный теплообмен?

2. В чем отличие поверхностных теплообменников от контактных, рекуперативных от регенеративных?

3. Основные теплотехнические и эксплуатационные характеристики промышленных теплообменников типа "труба в трубе".

4. С какой целью составляется тепловой баланс теплообменника?

5. Напишите уравнение теплового баланса для двухпоточного теплообменника, если оба теплоносителя – жидкости.
6. Напишите уравнение теплового баланса для двухпоточного теплообменника, если один из теплоносителей жидкость, а другой – насыщенный пар.
7. Напишите уравнение теплового баланса для двухпоточного теплообменника, если один из теплоносителей жидкость, а другой – перегретый пар.
8. Из какого уравнения определяют площадь поверхности теплообмена при расчете рекуперативного теплообменника.
9. Физический смысл коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи.
10. Методика расчета коэффициента теплоотдачи при стационарном теплообмене.
11. Какие критериальные уравнения используются при определении коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции ?
12. Какие критериальные уравнения используются при определении коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции ?
13. Влияет ли изменение направления одного из теплоносителей на величину среднего температурного напора?
14. В каком случае при расчете рекуперативного теплообменника вместо среднелогарифмической разности температур можно воспользоваться среднелингарифметической?
15. Как определить термическое сопротивление незагрязненной поверхности теплообмена?
16. Способы интенсификации теплопередачи.

## Лабораторная работа №2

### Определение энергозатрат на выпаривание раствора в однокорпусной выпарной установке

**Цель работы:** ознакомиться с устройством выпарных аппаратов, освоить методику составления теплового баланса с целью определения энергопотребления установки.

**Выпариванием** называется процесс удаления растворителя из растворов твердых практически нелетучих веществ путем его испарения при кипении жидкости. Цель выпаривания – концентрирование растворов или кристаллизация из них растворенного вещества.

Концентрирование растворов методом выпаривания – один из наиболее распространенных технологических процессов в химической, металлургической, пищевой и других отраслях промышленности. На выпаривание растворов расходуется огромное количество энергии, а на создание выпар-

ных установок – большая масса углеродистых и легированных сталей, никеля и других металлов. Поэтому актуальным вопросом является рациональная организация процесса выпаривания, что позволяет обеспечить максимальную производительность при минимальных затратах тепла и металла.

Чаще всего нагревающим агентом при выпаривании служит водяной пар, называемый *греющим* или *первичным*. Пар растворителя, образующийся при выпаривании, называется *вторичным*.

Процессы выпаривания проводят под вакуумом, при повышенном и атмосферном давлениях. Выбор давления связан со свойствами выпариваемого раствора и возможностью использования тепла вторичного пара.

Выпаривание проводят в *однокорпусных* или *многокорпусных* выпарных установках. Более экономичными являются многокорпусные установки, так как в них первичным паром обогревается только первый корпус, в последующих же корпусах в качестве греющего используется вторичный пар предыдущего корпуса. При этом давление в последовательно соединенных корпусах снижается таким образом, чтобы обеспечить необходимую разность температур между вторичным паром предыдущего корпуса и раствором, кипящим в данном корпусе. Экономия первичного пара (и соответственно топлива) может быть достигнута также в однокорпусных выпарных аппаратах с тепловым насосом.

В промышленности применяются в основном непрерывно действующие выпарные установки.

Тепловую нагрузку выпарного аппарата или количество тепла, подводимого в единицу времени с греющим паром, можно определить из теплового баланса установки (для однокорпусного аппарата):

$$Q = D(I_2 - C'_2 \theta) = G C (t_k - t_n) + W(I - C' t_{\text{конд}}) + Q_{\text{конц}} + Q_n \quad (2.1)$$

где  $D$  – расход греющего пара, кг/с;  $I_2, I$  – энтальпии греющего и вторичного пара соответственно, кДж/кг;  $C'_2, C'$  – удельная теплоемкость конденсатов греющего и вторичного пара соответственно, кДж/(кг·°C);  $C$  – средняя удельная теплоемкость раствора, кДж/(кг·°C);  $\theta$  – температура конденсата греющего пара, °C;  $t_n, t_k, t_{\text{конд}}$  – соответственно начальная и конечная (равная температуре кипения раствора) температуры растворов и температура конденсата вторичного пара, °C;  $W$  – количество вторичного пара, испаряющегося из раствора в единицу времени, кг/с;  $Q_{\text{конц}}$  – теплота концентрирования в единицу времени, Вт;  $Q_n$  – теплота потерь в окружающую среду в единицу времени, Вт.

Теплота концентрирования выражает тепловой эффект концентрирования раствора, который может быть как положительным, так и отрицательным.  $Q_{\text{конц}}$  учитывают только тогда, когда она значительна и ею нельзя пренебречь.  $Q_n$  для выпарных аппаратов принимают равной

$(0,03...0,05)Q$  в зависимости от толщины тепловой изоляции аппарата. Величину  $Q_n$  можно также подсчитать по уравнению:

$$Q_n = \alpha S_{\text{нан}}(t_{\text{cm}} - t_{\text{возд}}), \quad (2.2)$$

где  $\alpha = \alpha_k + \alpha_l = 9,74 + 0,07(t_{\text{cm}} - t_{\text{возд}})$  – суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $S_{\text{нан}}$  – площадь наружной поверхности теплоизолированного аппарата, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{cm}}$  – температура наружной поверхности изоляции, °С;  $t_{\text{возд}}$  – температура окружающего воздуха, °С.

Поверхность теплопередачи выпарной установки определяют по основному уравнению теплопередачи:

$$S = Q / K \Delta t_{\text{пол}} \quad (2.3)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\Delta t_{\text{пол}} = t_z - t_k$  – полезная разность температур, °С;  $t_z$  – температура греющего пара, °С;  $t_k$  – температура кипения раствора, °С.

Температура кипения раствора определяется по формуле :

$$t_k = t_{\text{вн}} + \Delta' + \Delta'' + \Delta''' \quad (2.4)$$

Здесь  $t_{\text{вн}}$  – температура вторичного пара (определяется по давлению в аппарате), °С;  $\Delta'$  – температурная депрессия, °С;  $\Delta''$  – гидростатическая депрессия, °С;  $\Delta'''$  – гидравлическая депрессия, °С.

**Температурная депрессия**  $\Delta'$  равна разности между температурой кипения раствора и температурой кипения чистого растворителя. Величину  $\Delta'$  при любом давлении можно получить, пользуясь уравнением И.А. Тищенко:

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} (T^2 / r) \cdot \Delta'_{\text{атм}}, \quad (2.5)$$

Здесь  $\Delta'_{\text{атм}}$  – температурная депрессия при нормальном давлении (находится по справочным таблицам), °С;  $T$  – абсолютная температура кипения чистого растворителя при данном давлении, °С;  $r$  – удельная теплота парообразования чистого растворителя при данном давлении, кДж/кг.

**Гидростатическая депрессия** обусловлена разностью давлений в среднем слое кипящего раствора и на его поверхности. Давление в среднем слое определяется по формуле:

$$P_{\text{cp}} = P_{\text{вн}} + \rho_p g H / 2 \quad (2.6)$$

Здесь  $P_{\text{вн}}$  – давление вторичного пара, Па;  $\rho_p$  – средняя плотность раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – уровень раствора в кипятильных трубах, м.

По найденной величине  $P_{\text{cp}}$  с помощью справочных таблиц находят соответствующую температуру кипения растворителя  $t_{\text{cp}}$ , а затем гидростатическую депрессию:

$$\Delta'' = t_{\text{cp}} - t_{\text{вн}} \quad (2.7)$$

В связи с неточностью такого расчета, который не учитывает циркуляцию раствора, гидростатическую депрессию по практическим данным принимают в пределах  $1 \dots 3^{\circ}\text{C}$ .

**Гидравлическая депрессия** обусловлена гидравлическими сопротивлениями, которые должен преодолеть вторичный пар при его движении через сепарационные устройства и паропроводы. Повышение температуры кипения раствора, обусловленное гидравлической депрессией, обычно колеблется в пределах  $0,5 \dots 1,5^{\circ}\text{C}$ . Для единичного аппарата величину гидравлической депрессии можно принять равной  $1^{\circ}\text{C}$ .

### Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.1. Она состоит из выпарного аппарата 1, конденсатора 3, буферной колонки 4, мерной емкости 5, снабженной термометром. Питательная вода из подводящего трубопровода через конденсатор 3 подается в буферную колонку 4, из которой по нижнему соединительному патрубку 6 направляется в испаритель 2, наполняя его до уровня переливной трубки 7. Избыток воды отводится из испарителя через верхний соединительный патрубок 8 в буферную колонку 4 и через переливную трубку 7 удаляется из аппарата. Расход питательной воды через выпарную установку измеряется расходомером 10.

Исходный раствор в испарителе нагревается до температуры кипения и частично испаряется. Образовавшийся пар (вторичный) через зазор между корпусами аппарата 1 и испарителем 2 направляется в конденсатор, где конденсируется и стекает в мерную емкость 5.

Начальную температуру воды  $t_n'$ , температуру подпиточной воды  $t_n''$  и температуру конденсата  $t_{\text{конд}}$  измеряют термометрами 11, 12, 13.

Процесс выпаривания идет под атмосферным давлением.

### Порядок проведения эксперимента

1. После ознакомления с устройством выпарного аппарата открывают кран 14, заполняют аппарат раствором (водопроводной водой), измеряют его температуру  $t_n'$  термометром 11 и залитый объем  $V_0$ .

2. По разрешению преподавателя включают электронагреватель 9 и замечают время начала опыта.

3. С помощью крана 14 устанавливают расход воды, при котором температура после конденсатора 3 в течение опыта в среднем составляет  $60 \dots 80^{\circ}\text{C}$  (измеряется термометром 13).

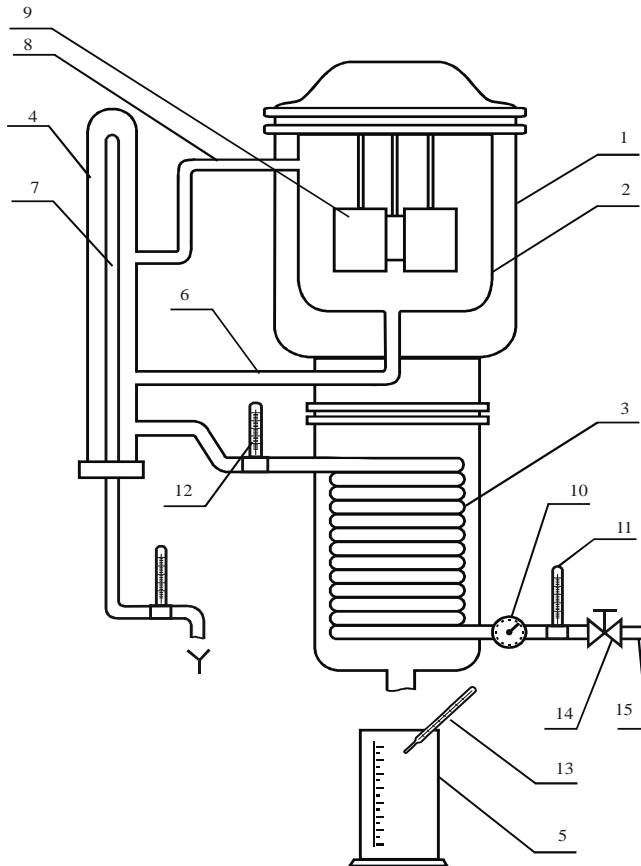


Рис. 2.1. Схема выпарной установки: 1 – выпарной аппарат; 2 – испаритель; 3 – конденсатор; 4 – буферная колонка; 5 – мерная емкость; 6, 8 – соединительные патрубки; 7 – переливная трубка; 9 – электронагреватель; 10 – расходомер; 11, 12, 13 – термометры; 14 – кран; 15 – подводящий трубопровод

4. Через 15 мин после начала опыта записывают показания термометров 12, 13, через 20 мин заканчивают опыт и выключают электронагреватель 9.

5. Измеряют объем конденсата  $V_{\text{конд}}$  и температуру  $t_{\text{конд}}$  в мерной емкости.

**ВНИМАНИЕ!** При снижении уровня жидкости в колонке 4 ниже кромки переливной трубки 7 необходимо выключить электронагреватель.

## Обработка результатов эксперимента

По температурам исходного раствора  $t_n'$ , конденсата  $t_{конд}$  и конечной температуре раствора, равной температуре кипения  $t_k$ , находят по таблицам соответствующие значения плотностей воды  $\rho_n^I$ ,  $\rho_k$ ,  $\rho_{конд}$ . Упаренный раствор находится в испарителе 2 и во время работы из установки не отводится. Поэтому массовый расход упаренного раствора за время опыта можно найти, умножив его плотность  $\rho_k$  на объем раствора  $V_0$  в аппарате:

$$G_k = \rho_k \cdot V_0.$$

Так как вторичный пар полностью конденсируется, его массовый расход  $W$  за время опыта равен массе полученного конденсата:

$$W = \rho_{конд} \cdot V_{конд}.$$

Расход исходного раствора  $G_n$  находят по уравнению материального баланса:

$$G_n = G_k + W.$$

Расход исходного раствора  $G_n$  во время опыта можно представить в виде суммы масс раствора  $G_n'$ , залитого в испаритель аппарата до начала опыта, и исходного раствора  $G_n''$ , подаваемого на "подпитку" в течение опыта:

$$G_n = G_n' + G_n'', \quad (2.8)$$

где  $G_n' = \rho_n^I \cdot V_0$ .

По уравнению (2.8) определяют величину  $G_n'$ .

Расход теплоты на выпаривание за время опыта  $\Delta\tau$  вычисляют по уравнению (2.1). С учетом особенностей данной лабораторной установки это уравнение приобретает следующий вид:

$$Q = G_n' \cdot C(t_k - t_n') + G_n'' \cdot C(t_k - t_n'') + W(I - C' \cdot t_{конд}) + Q_n.$$

Температуру кипения  $t_k$  определяют по формуле (2.4). Для расчета удельной теплоемкости раствора при малых концентрациях  $X$  растворенного вещества пользуются приближенной формулой:

$$C = 4190(1 - X),$$

где  $X$  – средняя концентрация раствора, **массовая доля**.

Концентрацию исходного раствора задает преподаватель. Концентрация упаренного раствора определяется из уравнения материального баланса по растворенному веществу:

$$G_n X_n = G_k X_k.$$



По рассчитанному значению  $Q$  определяют потребляемую мощность выпарной установки с электронагревателем:

$$N = Q/\Delta\tau.$$

### Контрольные вопросы

1. Какой технологический процесс называют выпариванием?
2. Что является движущей силой процесса выпаривания?
3. Перечислить конструкции выпарных аппаратов.
4. Для чего необходим сепаратор в поверхностных выпарных аппаратах?
5. Каким уравнением описывается процесс выпаривания в аппарате непрерывного действия?
6. Напишите уравнение материального баланса выпарного аппарата непрерывного действия.
7. Напишите уравнение теплового баланса выпарного аппарата непрерывного действия.
8. Как повысить тепловую экономичность выпарной установки?
9. Как подсчитать тепловую нагрузку однокорпусного выпарного аппарата?
10. Как определить температуру кипения раствора?
11. Что такое температурная депрессия, от каких факторов зависит ее величина?
12. Чем обусловлена гидростатическая депрессия?
13. Как рассчитать гидростатическую депрессию?
14. Чем обусловлена гидравлическая депрессия?

### Лабораторная работа №3

#### Исследование процесса сушки строительных материалов

**Цель работы:** исследование изменения влагосодержания материала и скорости сушки во времени, определение значения критической влажности материала.

#### Основные понятия

Сушка материала – весьма распространенный технологический процесс. Нет ни одной отрасли промышленности, где бы этот процесс не имел места. Это - энергоемкий процесс. В целом в нашей стране на сушку расходуется около 12 % всей энергии добываемого топлива. Поэтому правильно выбранный оптимальный режим сушки должен соответствовать минимальным затратам тепла и энергии, максимальной скорости удаления влаги при наилучших технологических свойствах обрабатываемых материалов.

Сушка представляет собой процесс удаления влаги из твердых и пастообразных материалов путем ее испарения и отвода образующихся паров. Поэтому сушка может происходить только при условии подвода теплоты, необходимой для испарения влаги и при наличии разности парциальных давлений паров воды над поверхностью изделия  $P_{\text{изд}}$  и в окружающей среде  $P_{\text{с}}$ , причем  $P_{\text{изд}}$  должно быть больше  $P_{\text{с}}$ . Процесс сушки прекращается, когда  $P_{\text{изд}} = P_{\text{с}}$ , т.е. наступает равновесие в процессе обмена влагой между изделием и средой.

Сушка проводится под атмосферным давлением и под вакуумом, при этом высушиваемый материал может находиться в состоянии покоя, перемещиваться в "кипящем слое" и так далее.

По способу подвода теплоты сушка подразделяется на конвективную, контактную, радиационную, электрическую, сублимационную.

Процесс сушки является сочетанием связанных друг с другом процессов тепло- и массообмена (влагообмена). Возникающие при сушке градиенты температур и влагосодержаний вызывают механические напряжения в изделиях. Интенсивность удаления влаги из материала не может быть произвольно большой и не должна быть слишком малой, быстрое испарение влаги приводит к превышению допустимых напряжений в материале изделия и к разрушению его структуры, к массовому браку. Необоснованно длительный процесс сушки вызывает снижение производительности установки и увеличение энергозатрат.

Протекание процесса сушки зависит от свойств высушиваемого материала, характера связи с ним влаги и параметров окружающей среды.

Связь влаги с материалом может быть физико-механической, физико-химической и химической. Механически связанная влага макро- и микрокапилляров наименее прочно связана с материалом и наиболее легко удаляется из него. Более прочно связана с материалом влага, которая поглощается поверхностью мелких капилляров (адсорбционная влага) или проникает вследствие диффузии влаги внутрь клеток материала (структурная и осмотически связанная влага). Влага, химически связанная с материалом (гидратная или кристаллогидратная), в процессе сушки обычно не удаляется.

Как высушиваемый материал, так и сушильный агент характеризуются следующими параметрами: абсолютной и относительной влажностью и влагосодержанием.

**Абсолютной** влажностью материала называется отношение массы влаги материала к массе сухого вещества, выраженное в %:

$$\omega = \frac{W}{G_{\text{с}}} 100, \quad (3.1)$$

где  $W = G_{\text{т}} - G_{\text{с}}$  – количество влаги, кг;  $G_{\text{т}}$  – масса материала в данный момент времени, кг;  $G_{\text{с}}$  – масса сухого материала, кг.

**Относительной** влажностью материала называется отношение массы влаги материала к массе влажного материала, выраженное в %:

$$\omega_0 = \frac{W}{G_\tau} 100. \quad (3.2)$$

Помимо понятия влажности используют понятие влагосодержания материала, представляющего собой отношение массы влаги к массе сухого материала в относительных единицах; кг влаги/кг сухого материала:

$$U = \frac{W}{G}. \quad (3.3)$$

Интенсивность удаления влаги из материала характеризуется скоростью сушки. Под скоростью сушки понимают изменение влагосодержания в единицу времени:

$$\nu = \frac{du}{d\tau}. \quad (3.4)$$

Теплоносителем, а при конвективной сушке и влагонositелем, является влажный воздух или дымовые газы.

Для анализа процесса сушки и расчета сушилок необходимо знать функциональную зависимость влагосодержания и интенсивности испарения влаги (скорости сушки) от времени.

Сушка материала имеет по времени характерные периоды, которые представлены на рис. 3.1

Материал с начальным влагосодержанием  $U_n$  и температурой  $t_n^M$  вносится в газовую среду с постоянной температурой  $t_c$ . В период предварительного прогрева  $\tau_{пр}$  температура его повышается до  $t_m$ . Влажность к концу этого периода снижается незначительно. Скорость сушки возрастает до некоторой величины  $N$ .

При контакте влажного материала с относительно сухим нагретым воздухом идет испарение влаги с поверхности материала и диффузия образующегося пара через пограничный слой газа в окружающую среду. В материале возникает градиент влагосодержаний и влага начинает перемещаться из внутренних слоев к поверхности.

Пока влагосодержание материала велико, влага, диффундирующая из глубинных слоев к наружным, будет полностью смачивать поверхность материала. В этих условиях количество влаги, испаряющейся с поверхности в единицу времени, определяется скоростью, с которой влага диффундирует через пограничный слой воздуха, насыщенного влагой.

При постоянстве внешних условий (температуры воздуха, его относительной влажности, скорости и направления движения) скорость сушки

будет постоянной. Поэтому этот период называется *периодом постоянной скорости* сушки, или первым основным периодом (участок АВ).

Поскольку в период постоянной скорости сушки поверхность материала покрыта пленкой влаги, которая испаряется при температуре мокрого термометра, то температура высушиваемого материала в этот период будет постоянной и приблизительно равной температуре мокрого термометра

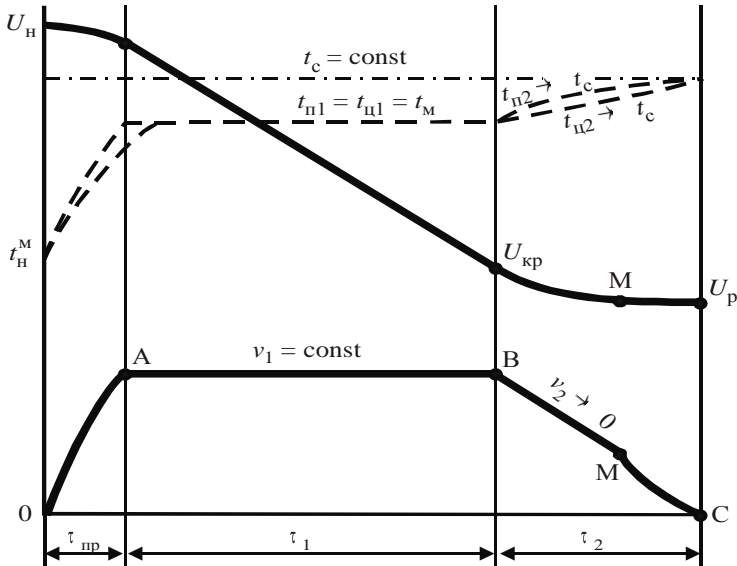


Рис. 3.1. Изменение скорости удаления влаги, влагосодержания и температуры материала в процессе сушки во времени

Начиная с некоторого момента влаги, подводимой к поверхностным слоям, будет недостаточно для полного смачивания поверхности, сначала на ней появятся сухие участки («островки»), а затем вся поверхность материала окажется сухой, и зона испарения углубится внутрь материала. С этого момента скорость сушки начнет уменьшаться. Влагосодержание материала, при котором начинается *период падающей скорости* (участок ВС), называется *критическим*  $U_{кр}$ .

Непосредственно за моментом достижения критического влагосодержания наступает период *падающей скорости сушки* (участок ВС), когда сокращение смоченной поверхности за счет появления "островков" приводит к уменьшению количества влаги, удаляемой со всей геометрической поверхности, т.е. к падению общей скорости сушки, хотя скорость испарения влаги со смоченной части поверхности не изменяется

При дальнейшем уменьшении влагосодержания вся зона испарения перемещается вглубь материала и скорость сушки будет зависеть только от скорости диффузии влаги к поверхности, т.е. от скорости внутренней диффузии влаги). Скорость внутренней диффузии зависит от структуры материала, его температуры, а также от физико-химических свойств жидкости. Для различных материалов вид кривой на этом участке может быть различным.

Сушку обычно заканчивают по достижении некоторого конечного влагосодержания, определяемого требованиями технологии. В пределе же конвективная сушка может продолжаться до тех пор, пока материал не достигнет равновесного влагосодержания  $U_p$ .

В период падающей скорости сушки (участок BC) температура материала растет, и при достижении материалом  $U_p$  становится равной температуре сушильного агента, а скорость сушки становится равной нулю. На рис. 3.2 изображено изменение состояния материала в процессе сушки.

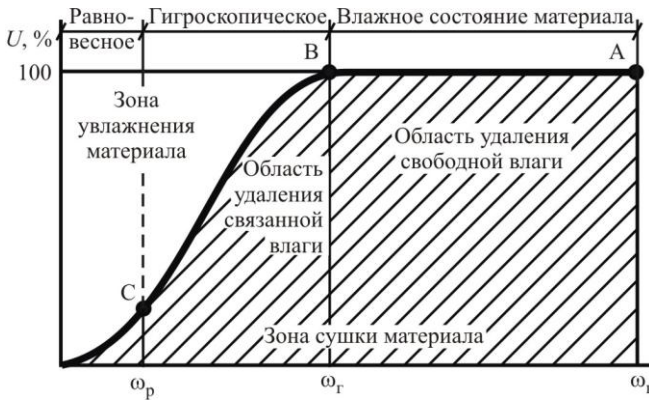


Рис. 3.2. Изотерма сорбции процесса сушки

При изменении влажности от  $\omega_n$  до  $\omega_g$  материал содержит свободную влагу и находится во влажном состоянии. При изменении влажности от  $\omega_g$  до  $\omega_p$  материал содержит связанную влагу и находится в гигроскопическом состоянии. Точка  $B$  называется гигроскопической, соответствующая ей влажность — гигроскопической влажностью  $\omega_g$ . Свободная влага будет удаляться из материала при любой относительной влажности окружающей среды, меньшей 100 %.

Удаление связанной влаги возможно лишь при той относительной влажности окружающей среды, которой соответствует влажность материала, большая равновесной.

На рис. 3.2 вся область, где материал может сушиться, заштрихована. При гигроскопическом состоянии материала, отвечающем области над кривой равновесной влажности, возможно только увлажнение материала, но не его сушка.

### Описание лабораторной установки

Установка представляет собой электрический сушильный шкаф с вмонтированной чашей весов и термометром.

### Порядок выполнения работы

1. Включают сушильный шкаф, доводят температуру в нем до  $100 \dots 105 \text{ }^\circ\text{C}$ .
  2. Взвешивают и записывают массу сухого образца.
  3. Увлажняют образец.
  4. Увлажненный образец помещают на чашу весов в шкафу и взвешивают.
  5. Записывают начальную массу образца.
  6. Взвешивают материал через каждые  $3 \dots 5$  мин. до постоянного веса
- Результаты измерений записывают в табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Интервал времени $\Delta\tau, \text{ с}$	$G_c, \text{ кг}$	$G_\tau, \text{ кг}$	$W, \text{ кг}$	$\bar{U}, \text{ кг/кг}$	$v, \text{ с}^{-1}$

### Обработка опытных данных

1. По формулам (3.3), (3.4) для каждого замера рассчитывают влагосодержание  $U$  и скорость сушки  $v$ .
2. По расчетным данным строят графики зависимостей  $U = f(\tau)$  и  $v = f(\tau)$ .
3. По кривым  $U = f(\tau)$  и  $v = f(\tau)$  находят значение критического влагосодержания  $U_{\text{кр}}$ .

### Контрольные вопросы

1. Какой технологический процесс называется сушкой?
2. Что такое потенциал сушки?
3. К каким процессам относится сушка?

4. Виды сушки.
5. Что такое относительная влажность материала и воздуха?
6. Дать определение влагосодержания материала и воздуха.
7. Что такое критическое и равновесное влагосодержание?
8. Что называют скоростью сушки?
9. При каких условиях скорость сушки в первом периоде постоянна и от каких факторов она зависит?
10. Чем определяется скорость сушки во втором периоде?
11. Как изменяется температура материала в процессе конвективной сушки?
12. Как влияет скорость воздуха на скорость сушки в I и II периоде?
13. Практическое применение изотермы сорбции сушки.
14. По каким уравнениям можно рассчитать количество испаренной влаги ?
15. Как можно рассчитать движущую силу процесса сушки?

### **Лабораторная работа №4**

#### **Изучение процесса сушки материала в сушилке "кипящего слоя"**

**Цель работы:** установить зависимость влияния температуры сушильного агента на входе в сушилку на ее тепловую экономичность, рассчитать удельную объемную производительность сушилки по влаге.

Сушка влажных зернистых материалов является одним из широко распространенных технологических процессов в промышленности. Разнообразие свойств материалов, подвергаемых сушке, вызвало необходимость создания различных конструкций сушильных аппаратов. В промышленной практике в качестве одного из важнейших способов интенсификации процессов сушки широко используется техника "кипящего слоя". Применение "кипящего слоя" позволяет значительно увеличить скорость процесса сушки, сократить продолжительность обработки материалов, вести процесс в непрерывном режиме, уменьшить объем используемого оборудования, автоматизировать процесс, но наряду с этим возрастают энергозатраты.

Теплота подводится в слой влажного материала с помощью сушильного агента. Чаще всего в качестве такого агента используется воздух, нагреваемый в калорифере до требуемой температуры. При нагреве воздухом влажного материала парциальное давление водяного пара над материалом становится больше парциального давления водяного пара в воздухе, в результате чего пары из влажного материала переходят в воздух (диффузия пара влаги в воздух), материал высушивается. Увлажнившийся воздух из сушильной камеры выбрасывается в атмосферу (нормальный сушильный вариант).

Если обозначить влагосодержание поступающего в калорифер воздуха через  $X_0$ , влагосодержание уходящего из сушилки воздуха через  $X_2$ , а массовый расход абсолютно сухого воздуха через  $L$ , то количество удаляемой из сушилки влаги  $W$  за единицу времени можно определить по формуле:

$$W = L(X_2 - X_0). \quad (4.1)$$

Количество сухого воздуха, необходимое для удаления 1 кг влаги, называется *удельным расходом воздуха*

$$l = \frac{L}{W}, \quad (4.2)$$

где  $l$  – удельный расход воздуха, кг воздуха/кг влаги.

Из уравнений (4.1) и (4.2) имеем

$$l = \frac{1}{X_2 - X_0}. \quad (4.3)$$

Расходы теплоты в калорифере  $Q_k$ , в сушильной камере  $Q_{ск}$  и полный расход теплоты на сушку  $Q$  находят соответственно по формулам

$$Q_k = L(I_1 - I_0); \quad (4.4)$$

$$Q_{ск} = L(I_2 - I_1); \quad (4.5)$$

$$Q = (Q_k + Q_{ск}) = L(I_2 - I_0), \quad (4.6)$$

где  $I_0; I_1; I_2$  – соответственно теплосодержание воздуха перед калорифером, после калорифера и после сушилки, кДж/кг.

Расход теплоты на 1 кг удаляемой влаги называют удельным расходом. Удельный расход теплоты в калорифере, сушильной камере и в целом на сушку определяют соответственно по формулам

$$q_k = \frac{Q_k}{W} = \frac{L}{W}(I_1 - I_0) = \frac{I_1 - I_0}{X_2 - X_0}; \quad (4.7)$$

$$q_{ск} = \frac{Q_{ск}}{W} = \frac{L}{W}(I_2 - I_1) = \frac{I_2 - I_1}{X_2 - X_0}; \quad (4.8)$$

$$q = q_k + q_{ск} = \frac{I_2 - I_0}{X_2 - X_0}. \quad (4.9)$$



Удельный расход теплоты в калорифере является важным показателем, характеризующим тепловую экономичность процесса сушки. В целом же экономичность процесса зависит как от удельного расхода теплоты, так и от удельного расхода воздуха.

Изменение параметров сушильного агента в процессе сушки можно изобразить на  $I$ - $x$  диаграмме (рис 4.1).

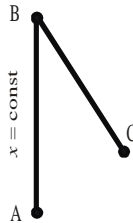


Рис. 4.1. Изменение параметров сушильного агента в процессе сушки на  $I$ - $x$  диаграмме

Точка  $A$  – характеризует состояние влажного воздуха на входе в калорифер, строится по параметрам  $t_0$  и  $\varphi_0$ . При нагревании воздуха в калорифере до  $t_1$  его влагосодержание остается постоянным, этот процесс на  $I$ - $x$  диаграмме изобразится линией  $AB$ . Точка  $B$  соответствует состоянию воздуха на выходе из калорифера и строится по параметрам  $X_1 = X_0$  и  $t_1$ . Процесс изменения параметров воздуха во время сушки изобразится прямой  $BC$ . Точка  $C$  имеет параметры  $(t_2, \varphi_2)$ .

Интенсивность теплообмена в сушилке характеризуется величиной *удельной объемной производительности сушилки по влаге*

$$A_v = \frac{W}{V_p}, \quad (4.10)$$

где  $W$  – количество испаренной влаги в единицу времени, кг/с;  $V_p$  – рабочий объем сушильной камеры,  $\text{м}^3$ .

### Описание лабораторной установки

Установка состоит из сушильной камеры, представляющей собой стеклянный вертикальный цилиндр 1 с внутренним диаметром 120 мм (рис. 4.2). В нижней части цилиндра установлена распределительная сетка 4, на которой находится зернистый слой материала. Сушильный агент, нагретый в калорифере 5 воздух, вентилятором 7 через перфорированную насадку равномерно подается под слой зернистого материала, который при

достижении определенной скорости подачи воздуха переходит во взвешенное состояние.

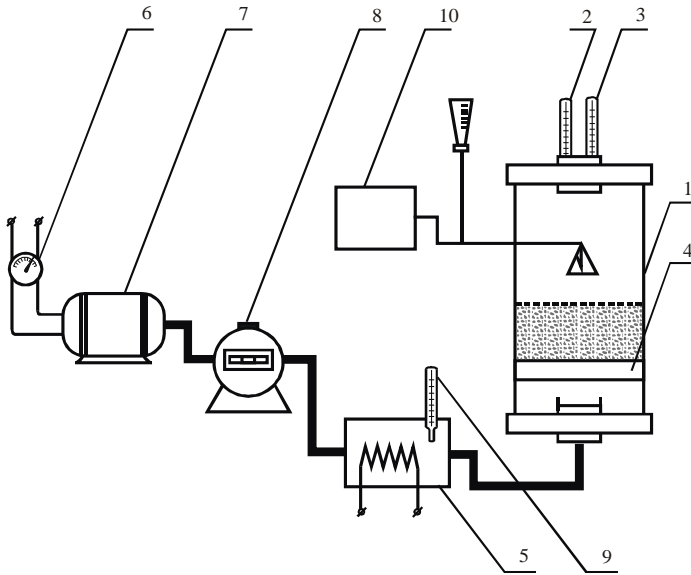


Рис. 4.2. Схема сушильной установки «кипящего» слоя: 1 – сушильная камера; 2, 3 – термометры; 4 – распределительная сетка; 5 – калорифер; 6 – ЛАТР; 7 – вентилятор; 8 – газовый счетчик; 9 – контактный термометр; 10 – компрессор

Расход воздуха определяют по показаниям газового счетчика 8. Температура воздуха за калорифером задается и контролируется контактным термометром 9, а выходящего из сушилки воздуха – психрометром (сухой и мокрый термометры 2 и 3). Скорость подачи воздуха регулируется лабораторным автотрансформатором 6. Материал увлажняется через распылитель с помощью компрессора 10.

### Порядок проведения эксперимента

1. До включения установки снимают показания психрометра и термометра ( $t_0$ ,  $t_{ом}$ ).
2. С помощью контактного термометра задают температуру  $t_1$  по указанию преподавателя.
3. Проводят холостой опыт с целью подбора режима нормальной работы установки. Для этого включают установку и, регулируя расход воздуха лабораторным автотрансформатором, приводят зернистый слой в устойчивое состояние псевдоожижения. По достижении стационарных показаний кон-



3. По рассчитанным значениям удельных расходов теплоты и воздуха на сушку для каждого опыта строят графики  $q = f(t)$  и  $l = f(t)$ .

4. Рассчитывают расход воздуха на сушку в каждом опыте:

$$L = \frac{\rho \Delta V}{\tau}, \quad (4.11)$$

где  $\Delta V = V_k - V_n$ , м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воздуха при средней температуре в сушилке, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время сушки, с.

5. По формуле (4.2) и удельному расходу воздуха в каждом опыте определяют среднее количество удаляемой влаги в единицу времени.

6. Рассчитывают удельную объемную производительность сушилки по влаге.

### Контрольные вопросы

1. В чем преимущества и недостатки сушилки "кипящего слоя" перед другими сушилками твердого зернистого материала?

2. Чем объясняется повышенное энергопотребление в сушилках "кипящего слоя".

3. Какая теплотехнологическая схема сушки называется основным сушильным вариантом?

4. В чем отличие действительной сушилки от теоретической? Изобразите процессы в этих сушилках на  $I$ -х диаграмме.

5. Что служит показателем тепловой экономичности процесса сушки?

6. Какие параметры сушильного агента влияют на тепловую экономичность сушки по основному сушильному варианту?

7. Что называется удельным расходом воздуха на сушку?

8. Как влияет температура сушильного агента на входе в сушилку на удельный расход воздуха?

9. Как влияет температура сушильного агента на входе в сушилку тепловую экономичность сушилки?

Как влияет температура сушильного агента на выходе из сушилки на тепловую экономичность сушилки?

10. Что характеризует и в каком расчете используется величина удельной объемной производительности сушилки по влаге?

10. Какой формы сушилку "кипящего слоя" целесообразно применять при сушке полидисперсного материала и почему?

11. Каков физический смысл понятия КПД сушильной установки и как его можно вычислить для теоретической сушилки?

## Лабораторная работа №5

### Определение тепловых потерь при обработке бетона в лабораторной пропарочной камере в период прогрева

**Цель работы:** изучение методики составления теплового баланса пропарочной камеры с целью определения величины тепловых потерь, а также удельного расхода теплоты на обработку бетонного изделия.

Ускорение твердения бетона путем пропаривания его в пропарочной камере при атмосферном давлении и температуре до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  получило наибольшее распространение на заводах сборного железобетона.

Для получения изделий требуемой прочности и структуры необходимо правильно назначить режим тепловлажностной обработки. Режим тепловой обработки включает в себя параметры периодов подогрева, изотермической выдержки (при максимальной температуре) и охлаждения. Он характеризуется длительностью каждого периода, максимальной температурой изотермического прогрева и влажностью среды. За оптимальный режим тепловлажностной обработки принимают такой режим, при котором время обработки было бы минимальным, а прочность готового изделия наиболее высокой и одинаковой по сечению образца. Режимы могут быть жесткими и мягкими. Жестким режимам отвечают жесткие условия формирования структуры бетона: короткое предварительное выдерживание свежесформованных изделий, быстрый подъем температуры, высокая температура изотермического прогрева, недостаточно влажная среда, медленная распалубка и т. д. Мягкие режимы сочетают длительное предварительное выдерживание, медленный подъем температуры, низкую температуру изотермической выдержки, влажную среду и т. д.

Повышение интенсивности нагрева и охлаждения изделий лимитируется механическими нарушениями структуры твердеющего бетона, что приводит к снижению качества изделий. Связано это с тем, что в процессе тепловлажностной обработки бетона наблюдаются как конструктивные (образование цементного камня), так и деструктивные (под действием градиентов температур, влагосодержаний и давлений) процессы.

С теплотехнической стороны процесс тепловой обработки бетона – характерный случай нестационарного теплообмена, поэтому на протяжении почти всего цикла тепловой обработки имеет место перепад между температурами на поверхности и в центре изделия (по сечению изделия).

Длительность изотермической выдержки определяется с учетом времени, необходимого для более полной гидратации вяжущего, а последнее зависит от скорости выравнивания температуры по сечению изделия.

Изучение распределения температуры по сечению изделия в каждом периоде – важнейший фактор, позволяющий правильно назначить режим тепловлажностной обработки. Не увеличивая общую длительность цикла обработки, можно, например, сократить длительность изотермического прогрева. При этом увеличится время охлаждения, что даст возможность не только сэкономить расход пара, но и повысить качество бетона за счет уменьшения температурных перепадов на наиболее опасной стадии тепловлажностной обработки – при охлаждении.

Одним из основных показателей работы тепловых установок является коэффициент полезного действия – отношение полезной теплоты, необходимой для физико-механических изменений и придания материалу новых свойств, ко всему количеству теплоты, затраченной на тепловую обработку. Однако тепловлажностные установки нельзя сравнивать по КПД, поскольку в процессе пропаривания бетонных изделий нет затрат теплоты на эндотермические реакции, на испарение или расплавление (как основной процесс). Наоборот, в процессе твердения бетонов выделяется теплота, которую в идеальном процессе, когда ее потери (в окружающую среду, с выбиванием пара и т. д.) исключены, необходимо отводить в специальный холодильник. Причем тем больше, чем выше расход цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетона.

Установки для тепловлажностной обработки сравнивают по другому основному показателю работы – удельному расходу теплоты, затрачиваемой в процессе тепловлажностной обработки на  $1 \text{ м}^3$  бетона, имеющего определенные теплофизические характеристики, например плотность, удельную теплоемкость. Чем меньше фактический удельный расход теплоты на пропаривание бетона, тем лучше, с теплотехнической точки зрения, работает установка при прочих одинаковых показателях. Этими показателями являются: расход и марка цемента, состав бетонной смеси, отношение массы формы к массе бетона, основные условия режима обработки.

Определить удельный расход теплоты, пара, газа, электроэнергии на  $1 \text{ м}^3$  бетона, а также максимальный часовой расход теплоты (пара, газа, электроэнергии) на камеру, кинетику роста температуры бетонных изделий в зависимости от изменения температурного режима среды в камере можно найти из теплового баланса пропарочной камеры.

Тепловой баланс камеры периодического действия, как и материальный, составляют на весь цикл работы раздельно по периодам нагревания и изотермической выдержки.

**В период нагревания** за время  $\tau_n$  изделия нагреваются до температуры  $t_{\text{бк}}$ . Теплота источника (ТЭНов)  $Q_{ul}$  в камере расходуется на нагревание бетона  $Q_{\text{бл}}$ , форм  $Q_{\text{фл}}$ , воды, залитой в камеру  $Q_{\text{вл}}$ , воздуха в камере  $Q_{\text{возд}}$ , металла конструкции камеры  $Q_{\text{кл}}$  и восполнение потерь в окружающую среду  $Q_{\text{нл}}$ . Кроме того, при нагревании бетона в результате реакций гидратации цемента выделяется теплота экзотермии  $Q_{\text{э}}$ .

Уравнение теплового баланса для периода нагревания имеет следующий вид:

$$Q_{u1} + Q_{\text{з}1} = Q_{\text{б}1} + Q_{\text{ф}1} + Q_{\text{в}1} + Q_{\text{возд}1} + Q_{\text{к}1} + \sum Q_{n1}. \quad (5.1)$$

Из этого уравнения определяют теплоту источника нагревания в период нагревания изделий.

При *изотермической выдержке* изделий температура среды в камере остается постоянной. Изделия продолжают нагреваться, из них испаряется влага, на что расходуется теплота  $Q_{ув}$ . Продолжают выделяться теплота экзотермии цемента  $Q_{\text{з}2}$ . Кроме того, теплота расходуется на потери в окружающую среду.

Все затраты тепловой энергии должны восполняться за счет источника нагревания  $Q_{u2}$  и экзотермии цемента. Тогда уравнение теплового баланса для периода изотермической выдержки приобретает такой вид:

$$Q_{u2} + Q_{\text{з}2} = Q_{\text{б}2} + Q_{ув} + \sum Q_{n2}. \quad (5.2)$$

Отсюда можно определить количество теплоты, которое нужно получить от источника нагревания в период изотермической выдержки  $Q_{u2}$ . Так как в период охлаждения теплота не потребляется, то общее количество теплоты от источника нагревания на обработку изделия

$$Q_u = Q_{u1} + Q_{u2}. \quad (5.3)$$

Удельное количество теплоты рассчитывают по формуле

$$q_u = \frac{Q_u}{V_б}. \quad (5.4)$$

Если количество теплоты, полученное от источника нагревания известно, то, используя уравнения (5.1)...(5.3), можно уточнить потери теплоты.

На основе теплового баланса камеры подбирают трубопровод для подвода теплоносителя, дроссельные диафрагмы, регуляторы давлений и температуры, основные элементы системы автоматики процесса обработки.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.1) состоит из пропарочной камеры 1, в которую помещается стакан 2 с обрабатываемым образцом. Нагрев воды в камере осуществляется электронагревателями (ТЭНами). 5. Температура среды и температуры по сечению образца контролируются термомпарами 3. Кроме того, амперметром и вольтметром измеряются ток и напряжение, подаваемое на электронагреватели. Включение и отключение пропарочной камеры осуществляется с помощью пульта управления 6. Камера закрывается крышкой 4 при помощи педали 7.

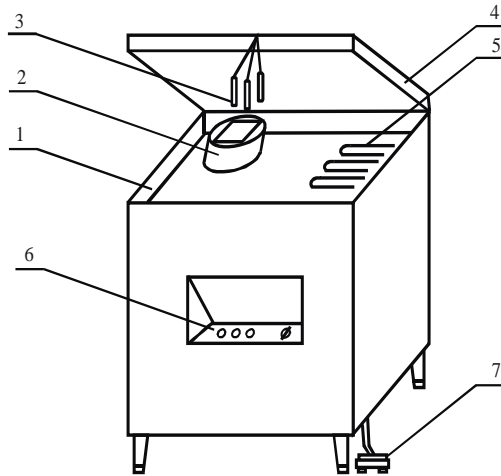


Рис. 5.1. Схема установки для термовлажностной обработки бетона: 1 – пропарочная камера; 2 – стакан с образцом; 3 – термопары; 4 – крышка камеры; 5 – электронагреватели; 6 – пульт управления; 7 – педаль

### Порядок проведения эксперимента

1. Взвешивают металлическую форму ( $G_{\phi}$ ).
2. Формуют образец из бетона по своим исходным данным.
3. Рассчитывают массу обрабатываемого образца  $G_{\delta}$ .
4. Производят необходимые замеры для определения объема камеры  $V_{к}$ , объема свободного пространства камеры  $V_{ск}$  и начального объема воды  $V_{вн}$ , залитой в камеру.
5. Измеряют температуру воды, залитой в камеру,  $t_{вн}$ .
6. Помещают форму с образцом в камеру.
7. Устанавливают термопары для измерения температуры среды и центра образца.
8. Закрыв крышку, включают камеру и КСП4.
9. Заносят в табл. 5.1 время начала обработки, начальные температуры среды  $t_{сн}$  и образца  $t_{\delta н}$ , показания амперметра  $I$  и вольтметра  $U$ .
10. Когда температура среды достигнет постоянного значения (начало периода изотермической выдержки), в таблицу заносят время окончания периода нагрева, температуру среды  $t_{ск}$  и образца  $t_{\delta к}$ , показания  $I$  и  $U$  и выключают два ТЭНа.
11. Выключают установку, открывают крышку, замеряют конечную температуру воды  $t_{вк}$  и конечный объем  $V_{вк}$  воды в камере.



Таблица 5.1

Продолжительность периода, с	Масса			$V_{об}, \text{м}^3$	$V_{отв}, \text{м}^3$	Температура				I, A	U, В	
	$G_m, \text{кг}$	$G_b, \text{кг}$	$G_g, \text{кг}$			воды в камере $t_{в}, \text{°C}$	металлических конструкций $t_{м}, \text{°C}$	среды $t_{с}, \text{°C}$	Образца $t_{об}, \text{°C}$			

### Обработка результатов эксперимента

1. Теплота, затраченная на нагрев бетонной смеси, кДж

$$Q_{б1} = G_b \left( \frac{G_c C_c + G'_g C'_g}{G_c + G_g} \right) (t_{бк} - t_{бн}), \quad (5.5)$$

где  $G_c$  – масса сухих составляющих образца, кг;  $G'_g$  – масса воды, содержащейся в образце, кг;  $G_b$  – масса бетона, кг;  $C_c$  – средняя удельная теплоемкость сухих составляющих бетона, кДж/(кг·°C);  $C_g$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C).

2. Теплота, израсходованная на нагрев форм, кДж,

$$Q_{ф1} = G_f C_m (t_{фк} - t_{фн}), \quad (5.6)$$

где  $C_m$  – средняя удельная теплоемкость металла, кДж/(кг·K);  $t_{фн}$  и  $t_{фк}$  – соответственно начальная и конечная температура формы в период нагревания °C.

3. Теплота, пошедшая на нагрев воды, залитой в камеру, кДж,

$$Q_{в1} = G_v C_v (t_{вк} - t_{вн}), \quad (5.7)$$

где  $G_v$  – масса воды, залитой в камеру, кг.

4. Теплота, затраченная на испарение части воды, залитой в камеру, кДж,

$$Q_{но} = (V_{вн} - V_{вк}) \cdot \rho_v \cdot r, \quad (5.8)$$

где  $\rho$  – средняя плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

5. Теплота, затраченная на нагрев металла ограждений камеры, кДж:

$$Q_{к1} = G_m C_m (t_{мк} - t_{мн}), \quad (5.9)$$

где  $G_m$  – масса металлической конструкции камеры (25 кг);  $t_{ми}$  и  $t_{МК}$  – соответственно начальная и конечная температура металла ограждений,  $^{\circ}\text{C}$ .

6. Теплота, затраченная на нагрев воздуха в камере, кДж,

$$Q_{возд1} = \rho_{возд} V_{ск} (t_{ск} - t_{сн}) C, \quad (5.10)$$

где  $V_{ск}$  – объем свободного пространства камеры,  $\text{м}^3$ ;  $t_{ск}$  – температура среды в конце периода,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{сн}$  – температура среды в начале периода,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_{возд}$  – плотность воздуха при средней температуре среды за период нагревания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

7. Теплота, потерянная в окружающую среду ограждениями камеры, кДж,

$$Q_{н1} = \alpha S (t_n - t_{oc}) \cdot \tau_n, \quad (5.11)$$

где  $t_n$  и  $t_{oc}$  – средние температуры поверхности камеры и окружающей среды соответственно, К;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи (излучением и конвекцией) от поверхности камеры в окружающую среду,  $\alpha = 9,74 + 0,07(t_n - t_{oc})$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $S$  – площадь наружной поверхности камеры,  $\text{м}^2$ .

8. Теплота, выделенная нагревателями за период нагревания, кДж,

$$Q_{и1} = IU \cdot \tau_n. \quad (5.12)$$

9. Теплота экзотермии цемента, выделившаяся за период нагревания, кДж,

$$Q_{э1} = Cq_э, \quad (5.13)$$

где  $C$  – масса цемента в образце, кг;  $q_э$  – теплота экзотермии 1кг цемента, кДж/кг,

$$q_э = 9,64 \cdot 10^{-4} M \theta (B / C)^{0,44}. \quad (5.14)$$

где  $\theta = t_{бср} \cdot \tau_n$  – число градусо-часов за период нагревания;  $t_{бср}$  – средняя температура бетона за период,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $M$  – марка цемента;  $B/C$  – водоцементное отношение.

10. Потери теплоты  $\sum Q_{н1}$  в период нагревания бетона определяют по уравнению (5.1).

11. Общие и удельное количество теплоты определяют по формулам (5.12) и (5.4).

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют термовлажностной обработкой и для каких целей он используется?

2. Какие теплоносители используются при термовлажностной обработке, и на чем основан их выбор?

3. Назвать и охарактеризовать стадии термовлажностной обработки.
4. Какие конструктивные и деструктивные процессы при термовлажностной обработке бетона.
5. От чего зависит выбор режимных параметров при термовлажностной обработке.
6. Методика составления теплового баланса пропарочной камеры.
7. С какой целью составляют тепловой баланс установок термовлажностной обработки?
8. Как влияют на экзотермию бетона марка цемента и водоцементное отношение?
9. Как рассчитать расход пара и диаметр паропровода в промышленной пропарочной камере?
10. По какому показателю можно сравнивать работу установок термовлажностной обработки бетона?
11. В чем заключаются конструктивные особенности ямных пропарочных камер?
12. Как можно повысить тепловую экономичность ямных пропарочных камер?

## Приложения

Приложение 1

**Физические свойства воды (на линии насыщения).**

P, ат	t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	i, кДж/кг	s, кДж/кг <sup>0</sup> С ·	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/м <sup>0</sup> С	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Пас	$\beta \cdot 10^4$ , °С <sup>-1</sup>	Pr
1	0	1000	0	4,23	55,1	1,31	1790	-0,63	13,7
1	10	1000	41,9	4,19	57,5	1,37	1310	+0,70	9,52
1	20	998	83,8	4,19	59,9	1,43	1000	1,82	7,02
1	30	996	126	4,18	61,8	1,49	804	3,21	5,42
1	40	992	168	4,18	63,4	1,53	657	3,87	4,31
1	50	988	210	4,18	64,8	1,57	549	4,49	3,54
1	60	983	251	4,18	65,9	1,61	470	5,11	2,98
1	70	978	293	4,19	66,8	1,63	406	5,70	2,55
1	80	972	335	4,19	67,5	1,66	355	6,32	2,21
1	90	965	377	4,19	68,0	1,68	315	6,95	1,95
1,03	100	958	419	4,23	68,3	1,69	282	7,5	1,75
1,46	110	951	461	4,23	68,5	1,69	256	8,0	1,58

Приложение 2

**Свойства насыщенного пара в зависимости от температуры.**

Темпе- ратура, ат	Давле- ние (абсо- лютное), ат	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная эн- тальпия жид- кости i', кДж/кг	Удельная эн- тальпия пара i'', кДж/кг	Удельная теп- лота паро об- разования r, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,90	0,01283	62,85	2522,4	2459,5
20	0,0238	57,80	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0523	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2114,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,05	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9

Окончание прил. 2

1	2	3	4	5	6	7
65	0,255	6,209	0,1611	272,4	2617,5	2345,2
70	0,318	5,052	0,1979	293,3	2626,3	2333,0
75	0,393	4,139	0,2416	314,3	2636,0	2321,0
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644,0	2310,0
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653,0	2297,0
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662,0	2285,0
95	0,862	1,985	0,5139	398,1	2671,0	2273,0
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679,0	2260,0
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687,0	2248,0
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696,0	2234,0
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704,0	2221,0
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711,0	2207,0
125	2,367	0,772	1,2960	525,4	2748,0	2194,0

Приложение 3

Значения коэффициентов  $A$  и  $n$  для критериального уравнения Нуссельта

Re	$A$	$n$
1–200	0,9	0,5
200–6000	0,87	0,54
6000–7000	0,347	0,65

Приложение 4

Теплофизические характеристики материалов

Материал	$m_v$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·°С)	$c$ , кДж/(кг·°С)	$a \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /ч
1	2	3	4	5
Бетон	2400	1,45	0,84	25,84
Железобетон	2400	1,56	0,84	27,95
Крупнопористый бетон	1900	0,99	0,84	22,3
Шлакобетон	1860	0,92	0,83	19,2
Золобетон	1640	0,505	0,98	11,34
Керамзитобетон	1700	0,41	0,56	15,4
Силикатобетон	1850	0,63	0,84	14,7
Газобетон	940	0,241	0,82	11,2
Пенобетон	400	0,138	1,65	7,64
Раствор	1800	0,93	0,84	22,2
Кирпич глиняный	1700	0,755	0,88	18,2
Кирпич силикатный	1900	0,815	0,84	18,4
Древесина	640	0,38	2,4	–
Металл	7800	56	0,46	–

Окончание прил. 4

1	2	3	4	5
Суглинок	1960	1,49	1,16	23,7
Песок кварцевый	1500	0,6	1,09	13
Керамзит	900	0,408	0,88	18,6
Шлак гранулированный	500	0,151	0,75	14,4
Минеральная вата	300	0,63	0,75	10
Минеральный войлок	250	0,076	0,76	14,4
Пеностекло	500	0,163	0,84	14
Стекланная вата	200	0,045	0,94	9,7
Стекланный войлок	50	0,044	0,89	35,6
Шлаковая вата	100	0,046	0,74	22,4
Резина	1200	0,163	1,38	9,5

Приложение 5

## Тепловыделение портландцемента

Марка цемента	200	300	400	500
$Q_{928}$ , кДж/кг	250	335	420	500

Приложение 6

Значение  $(В/Ц)^{0,44}$ 

В/Ц	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$(В/Ц)^{0,44}$	0,58	0,627	0,668	0,697	0,738	0,77	0,8

Приложение 7

## Среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок

Теплоносители	Тепловая проводимость загрязнений стенок $1/\gamma_{загр}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
Вода загрязненная	1400...1 860
» среднего качества	1860...2 900
» хорошего качества	2900...5 800
» очищенная	2900...5 800
» дистиллированная	11600
Нефтепродукты чистые, масла, пары хладагентов	2 900
Нефтепродукты сырые	1160
Органические жидкости, рассолы, жидкие хладагенты	5800
Водяной пар (с содержанием масла)	5800
Органические пары	11600
Воздух	2800

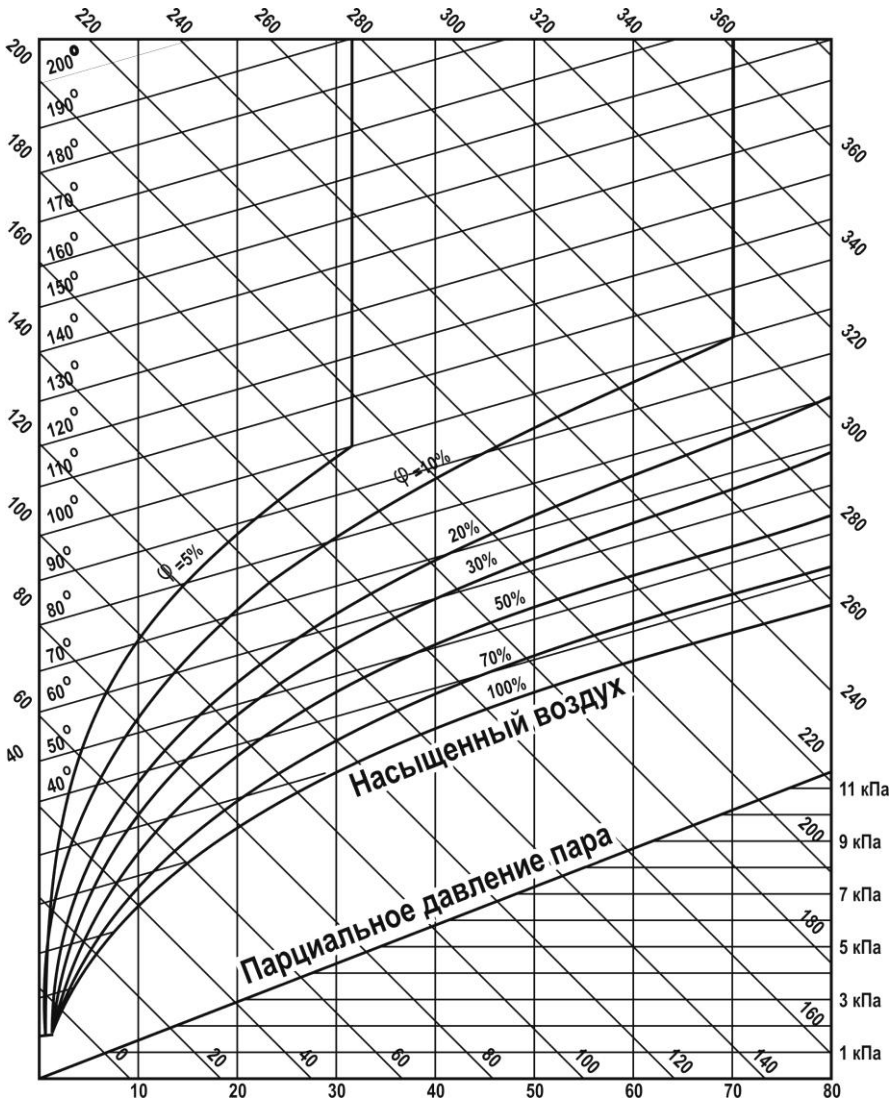


Диаграмма состояния влажного воздуха

## Библиографический список

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. / А. Г. Касаткин. – II-е изд. стереотип. и дораб. - М.: Альянс, 2005. – 753 с.
2. Кокшарев А. В.. Тепловые установки. / А. В. Кокшарев, А. Н. Кучеренко. – К.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
3. Павлов А.М. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии./ К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия. 1987, - 575 с.
4. Губарева В.В. Термовлажностные и низкотемпературные тепло-технологические процессы и установки. Ч.1 Учебное пособие. / В.В. Губарева, В.П. Кожевников, М.С. Шиманская. *Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области энергетики и теплотехники для студентов высших учебных заведений.* – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 142 с.
5. Бакластов А.М. Промышленные теплообменные процессы и установки. / А.М. Бакластов, В. А. Горбенко, О.Л. Данилов и др. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 328 с.
6. Муштаев В.И.. Сушка дисперсных материалов. / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.



## Содержание

Введение .....	3
Требования к выполнению лабораторных работ .....	4
Лабораторная работа №1. Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике ”труба в трубе” .....	4
Лабораторная работа №2. Определение энергозатрат на выпаривание раствора в однокорпусной выпарной установке .....	10
Лабораторная работа №3. Исследование процесса сушки строительных материалов .....	16
Лабораторная работа №4. Изучение процесса сушки материалов в сушилке ”кипящего слоя” .....	22
Лабораторная работа №5. Определение тепловых потерь при обработке бетона в лабораторной пропарочной камере в период прогрева .....	28
Приложения .....	35
Приложение 1. Физические свойства воды (на линии насыщения).....	35
Приложение 2. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры .....	35
Приложение 3. Значения коэффициентов $A$ и $n$ для критериального уравнения Нуссельта .....	36
Приложение 4. Теплофизические характеристики материала .....	36
Приложение 5. Тепловыделение портландцемента .....	37
Приложение 6. Значения $(B/C)^{0,44}$ .....	37
Приложение 7. Среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок.....	37
Приложение 8. Диаграмма состояния для влажного воздуха .....	38
Библиографический список .....	39

Учебное издание

**ГУБАРЕВА** Валентина Васильевна

## **Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки**

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов  
направления бакалавриата 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника  
профиля подготовки " Термовлажностные и низкотемпературные  
теплотехнологические процессы и установки "

Подписано в печать

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 2,4. Усл. изд. л. 2,9.

Тираж экз.

Заказ

Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова  
308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46