

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. Н. Ковальногов**  
**Р. В. Федоров**  
**А. А. Цынаева**

# **Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий**

Сборник учебно-исследовательских лабораторных работ  
для студентов-теплоэнергетиков

Ульяновск  
УлГТУ  
2012

УДК 620.9 (076)

ББК 31.3 я7

К 56

Рецензент Бондаренко А. А., канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации»

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета Ульяновского государственного технического университета

**Ковальногов, В. Н.**

К 56 Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий : сборник учебно-исследовательских лабораторных работ / В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров, А. А. Цынаева. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 34 с.

Изложены методические указания к выполнению учебно-исследовательских лабораторных работ по дисциплине «Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий» для студентов, обучающихся по направлению 14010062 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») и специальности 14010465 «Промышленная теплоэнергетика».

Работа подготовлена на кафедре «Теплоэнергетика».

**УДК 620.9 (076)**

**ББК 31.3 я7**

© Ковальногов В. Н., Федоров Р. В.,  
Цынаева А. А., 2012.

© Оформление. УлГТУ, 2012.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	5
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕ- ТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ, ПОРЯДОК ИХ ЗАЩИТЫ .....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА .....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОВОГО И ОБЪЕМНОГО ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО- ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ КОНВЕКТИВНОГО ТИПА .....	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ .....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ .....	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В ВАКУУМНОЙ СУШИЛКЕ .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	34

## **ВВЕДЕНИЕ**

Сборник учебно-исследовательских лабораторных работ предназначен для студентов направления 14010062 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») и специальности 14010465 «Промышленная теплоэнергетика. Сборник составлен в соответствии с программой дисциплины «Тепломассообменное оборудование промышленных предприятий» и содержит 6 работ.

Целью учебно-исследовательских лабораторных работ является закрепление теоретических вопросов, освоение студентами практических навыков, связанных с исследованием тепломассообменных процессов в сушильных установках, а также формирование профессиональной компетенции бакалавров, связанной с развитием способности к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных разработок по стандартным методикам.

Методическое обеспечение и экспериментальные установки для выполнения лабораторных работ разработаны по результатам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых кафедрой «Теплоэнергетика» Ульяновского государственного технического университета в рамках госбюджетной НИР № 01201162956 по теме «Моделирование и оптимизация тепловых и гидрогазодинамических процессов в элементах энергетических установок».

# **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

## **Общие положения**

К выполнению работ на экспериментальных установках во время лабораторных занятий допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Студенты обязаны:

1. Придерживаться следующего общего порядка выполнения лабораторных работ:

1.1. Ознакомиться с планом и методикой проведения лабораторного занятия, изучить принцип и порядок работы с экспериментальной установкой.

1.2. Приступить к работе после получения разрешения от руководителя занятия (преподавателя) или лаборанта.

1.3. После выполнения задания с разрешения руководителя занятия выключить установку, корректно завершить работу компьютера, отключить питание.

1.4. Привести в порядок рабочее место, составить и сдать отчет по лабораторной работе и после получения разрешения руководителя покинуть помещение.

2. Беспрекословно выполнять требования руководителя занятия и лаборанта.

3. В случае обнаружения неисправности лабораторных установок заявить об этом преподавателю или лаборанту.

Студенты, допускающие нарушение инструкций техники безопасности, противопожарной безопасности и правил настоящего руководства, немедленно удаляются из лабораторий.

## **Меры противопожарной безопасности**

1. Лаборатории, экспериментальные установки, приборы и инструменты содержать в чистоте.

2. Следить за исправностью и безопасным расположением электрических шнуров, кабелей, приборов, электротехнических изделий, компьютеров и средств оргтехники.

3. О всех замеченных технических неисправностях необходимо сооб-

щать руководителю занятия, лаборанту.

4. В лабораториях запрещается:

- курить и пользоваться огнем;
- загромождать проходы мебелью, другими предметами;
- приносить любые пожароопасные и взрывоопасные предметы, материалы;
- пользоваться электронагревательными приборами (электрочайники, электроплиты, обогреватели и т. д.);
- использовать кабели и провода с поврежденной изоляцией, неисправное электрооборудование;
- пользоваться поврежденными розетками, рубильниками и другими электроустановочными изделиями;
- использовать электрооборудование и приборы в условиях, не соответствующих рекомендациям (инструкциям) предприятий-изготовителей, или имеющие неисправности.

5. По окончании работ все электрооборудование должно быть обесточено.

### **Охрана труда и техника безопасности в компьютерном классе**

1. Включение электроприборов производится только с разрешения руководителя занятия (преподавателя).

2. Студенту необходимо: подготовить рабочее место, убрать ненужные для работы предметы; о всех замеченных технических неисправностях сообщить преподавателю.

3. По окончании работы необходимо: выключить экспериментальную установку, обесточить оборудование; привести в порядок рабочее место, убрать вспомогательные материалы и инструменты.

4. Запрещается:

- работать на неисправных установках;
- перекоммутировать оборудование;
- работать без соответствующего освещения и вентиляции рабочего места;
- работать, если при прикосновении к корпусам оборудования ощущается действие электрического тока;
- оставлять без присмотра включенные в электросеть электроприборы.

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ, ПОРЯДОК ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ**

По результатам выполнения каждой из представленных в последующих разделах лабораторных работ студент готовит и защищает отчет.

При выполнении лабораторных работ рекомендуется следующий порядок:

1. Ознакомиться с требованиями техники безопасности.
2. Усвоить цели работы.
3. Изучить лабораторную установку, схему, устройство и принцип работы, методику эксперимента, связь с теоретическими основами. Подготовить описание установки и журнал экспериментов.

4. Получить допуск у преподавателя к лабораторной работе, ответив на контрольные вопросы.

5. Выполнить эксперимент, занести полученные результаты в журнал. Показать их преподавателю для предварительной проверки.

6. Выполнить обработку результатов эксперимента, рассчитать необходимые параметры, построить графики. Сделать выводы.

7. Подготовить отчет о лабораторной работе, который оформляется на листах формата А4 и должен содержать следующие разделы:

- титульный лист (образец см. в приложении А);
- конспект теоретических сведений, цель работы;
- схему лабораторной работы и ее краткое описание;
- журнал с полученными данными измерений;
- расчеты, формулы, графики;
- выводы, включающие анализ полученных результатов.

Рекомендуемый объем отчета 5-10 листов.

8. Подготовиться к защите отчета, изучив и критически осмыслив его содержание, лекционный материал по ее теме и (при необходимости) дополнительную литературу (приложение Б). Ответить на контрольные вопросы.

9. Представить отчет преподавателю на проверку.

По результатам проверки отчета и (при необходимости) собеседования со студентом преподаватель делает отметку о выполнении или невыполнении лабораторной работы. Студент должен владеть представленным в отчете материалом, уметь мотивированно отстаивать принятые в ходе выполнения работы решения и объяснять полученные результаты. Отчет может быть возвращен на доработку, в этом случае преподаватель фиксирует на титульном листе отчета замечания, которые студент должен устранить в ходе доработки. Обязательным условием допуска студента к экзамену является выполнение всех предусмотренных учебным планом лабораторных работ. Кроме того, по итогам рассмотрения и защиты всех лабораторных работ в конце семестра преподаватель выставляет студенту оценку, которая учитывается на итоговом экзамене.



# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА**

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучение закономерностей исследования изменения параметров сушильного агента (воздуха) при сушке материалов с последующим отображением процессов увлажнения и подогрева в I-d диаграмме.

### **ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ**

Атмосферный воздух широко применяют в качестве технологической среды (рабочего тела, теплоносителя, сушильного агента) в самых разнообразных технологических процессах, пищевой, фармацевтической, химических отраслях промышленности, при производстве строительных материалов и др. Атмосферный воздух всегда содержит определенное количество влаги и представляет собой смесь сухого и водяного пара, состояние и свойство которой оказывают определяющее воздействие на эффективность технологического процесса. Репрезентативным с позиции выявления и изучения общих закономерностей является процесс сушки материалов, в котором избыточная влага отбирается из материала в сушильный агент.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Схема экспериментальной установки, моделирующей процесс сушки, представлена на рис. 1. Вентилятором 1 атмосферный воздух подают в камеру 2, где происходит его увлажнение за счет высушиваемого образца. Образец влажного материала, подвергаемый высушиванию, помещают в сушильную (испарительную) камеру 3. Относительная влажность воздуха до и после сушильной камеры определяется с помощью психрометров 4. Психрометры представляют собой комплекс двух термометров – «сухого» и «мокрого», шарик которого постоянно увлажняется. Для повышения эффективности

сушки подаваемый в камеру воздух подогревают с помощью нагревателя 2, при этом его температуру регулируют с помощью реостата 5.

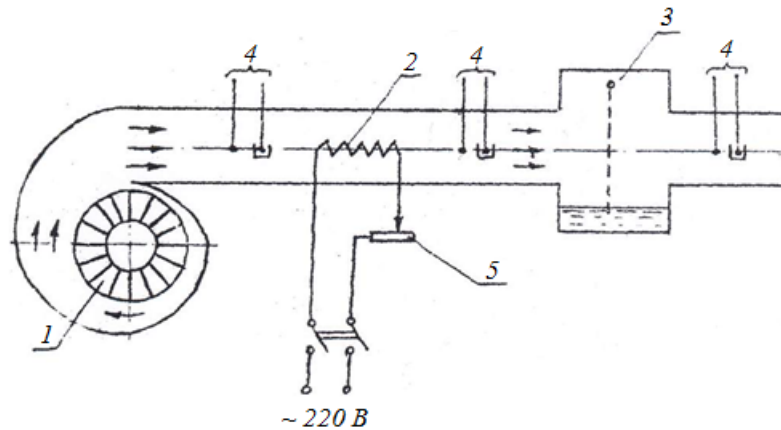


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор; 2 – электронагреватель; 3 – сушильная камера; 4 – психрометр; 5 – реостат

В основу методики положен психрометрический метод, сущность которого состоит в следующем. По показаниям психрометров определяется температура по «сухому» термометру и температура по «мокрому» термометру. С помощью психрометрического графика (рис.2) и I-d диаграммы (рис. 3) определяются основные параметры влажного воздуха (ср, I, d) и анализируются изменения в процессах подогрева и увлажнения.

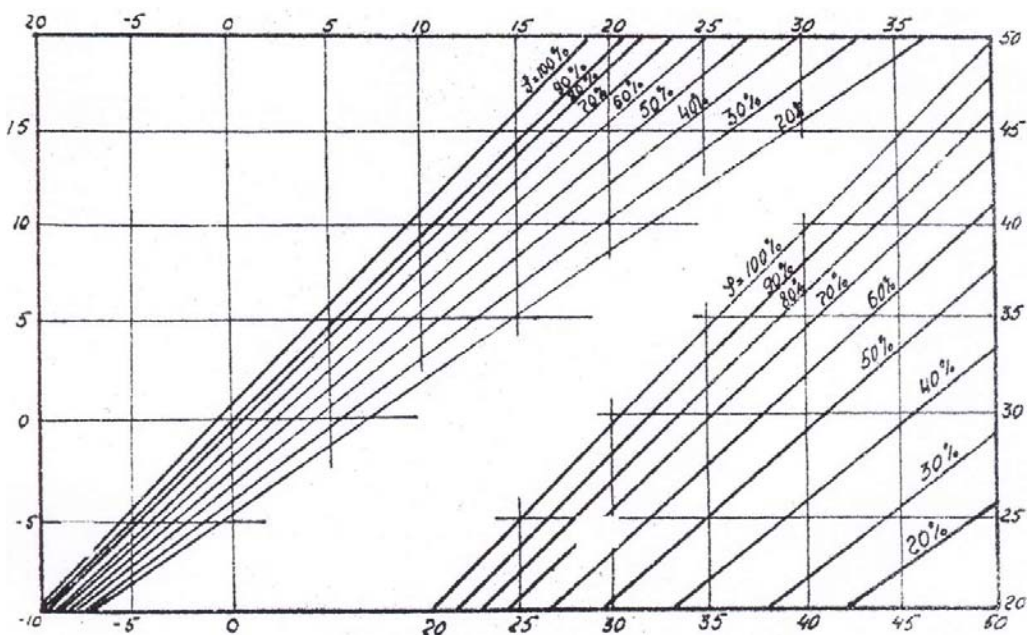


Рис. 2. Психрометрический график

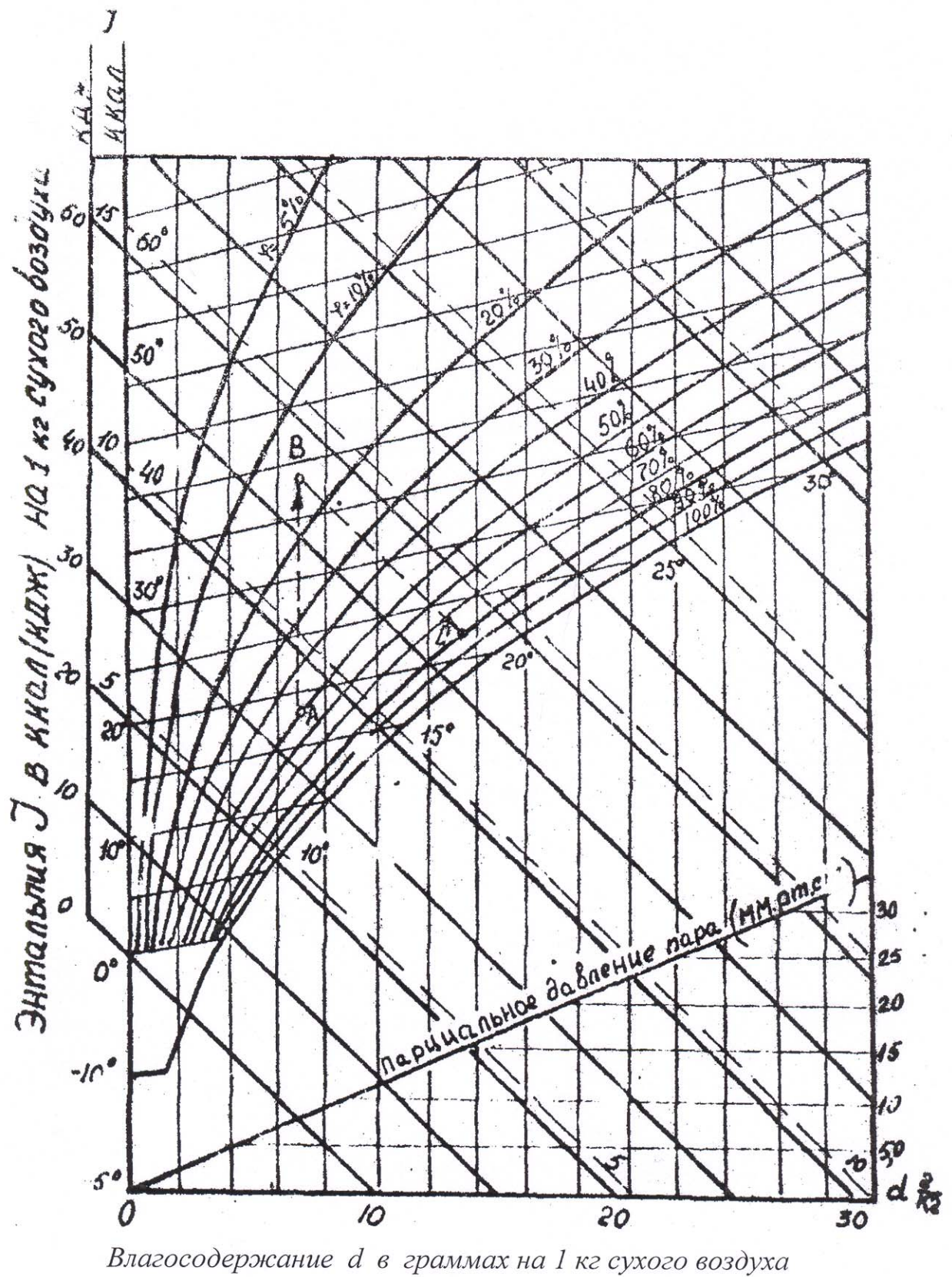


Рис. 3. Диаграмма I-d влажного воздуха

При нагревании воздуха его влагосодержание не изменяется ( $d=\text{const}$ ), а энтальпия возрастает. Следовательно, процесс нагрева на I-d диаграмме изображается прямой АВ (рис. 3).

В процессе увлажнения (сушка материала) теплота воздуха, затраченная на кипение влаги, возвращается вместе с паром воздуху. При этом увлажнении энтальпия I воздуха остается постоянной, и в I-d диаграмме процесс изображается прямой ВС, параллельной линии  $I=\text{const}$  (рис. 3).

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Включают вентилятор и электронагреватель экспериментальной установки. Установка прогревается, и после достижения стационарного режима (о чем можно судить по постоянству показаний психрометра II) регистрируются показания психрометров. Регистрацию повторяют несколько раз через равные промежутки времени, результаты измерений заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – результаты измерений

№п/п	Психрометр I		Психрометр II		Психрометр III	
	$T_c, K$	$T_m, K$	$T_c, K$	$T_m, K$	$T_c, K$	$T_m, K$

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По окончании эксперимента вычисляют средние значения измеренных величин. Используя показания «мокрого» и «сухого» термометров  $T_m$  и  $T_c$ , по графику (рис. 2) определяют влажность воздуха  $\phi$  в местах установки психрометров. По значениям  $T_c$  и  $\phi$  с помощью I-d диаграммы определяют параметры  $d$ ,  $I$ ,  $P_n$  и  $T_p$ . Все эти параметры определяются для воздуха в установке до и после сушильной камеры. Затем на I-d диаграмме строят процессы подогрева и увлажнения воздуха. Полученные графические зависимости необходимо сравнить с теоретическими процессами АВ и ВС.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое абсолютная влажность, относительная влажность, влагосодержание?
2. Поясните устройство и принцип работы сушильной установки.
3. Почему процесс в сушильной камере протекает при  $I=\text{const}$ ?
4. Как определить относительную влажность с помощью психрометра и психрометрической таблицы (графика)?
5. Как определяют параметры влажного воздуха по  $I-d$  диаграмме?
6. Почему показания «мокрого» термометра ниже, чем «сухого»? Всегда ли это так?
7. В обычном атмосферном воздухе содержатся пары воды. Температура воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Почему при этом пар не конденсируется?
8. Может ли конденсироваться пар при названных в вопросе 7 условиях? Ответ поясните.
9. Можно ли с помощью пара сушить материалы? Если можно, то при каких условиях?
10. Объясните явление выпадение тумана с точки зрения процессов влажного воздуха.
11. Объясните выпадение росы с точки зрения процессов влажного воздуха.
12. Почему испаряется вода выпавшего дождя?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОВОГО И ОБЪЕМНОГО ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытным путем определить массовое и объемное водопоглощение керамического кирпича.

#### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Водопоглощение – это свойство капиллярно-пористого материала впитывать и удерживать в своих порах воду. Оно характеризуется количеством (массой) воды, которую поглощает сухой материал при полном погружении и выдерживании в воде заданный промежуток времени, отнесенным к массе сухого материала (массовое водопоглощение  $W_M$ ) или к объему материала в сухом состоянии (объемное водопоглощение  $W_{OB}$ ). Водопоглощение кирпича определяют по ГОСТ 530–2007. Допустимым считается водопоглощение кирпича в диапазоне от 6% до 12%. Слишком высокое водопоглощение указывает на низкую морозостойкость кирпича, его повышенную теплопроводность.

Массовое водопоглощение выражают относительным числом или в процентах и вычисляют по формуле

$$W_M = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100, \%, \quad (1)$$

где  $m_2$  – масса кирпича, насыщенного водой, кг;

$m_1$  – масса сухого кирпича, кг.

Объемное водопоглощение определяется по формуле

$$W_{OB} = \frac{m_2 - m_1}{V \cdot \rho} \times 100, \%, \quad (2)$$

где  $V$  — объем кирпича в насыщенном состоянии, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – истинная плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Массовое водопоглощение показывает степень увеличения массы кирпича (за счет поглощенной воды), а объемное водопоглощение – степень заполнения объема материала водой.

Массовое и объемное водопоглощение различных материалов колеблется в широких пределах. Например, массовое водопоглощение керамических плиток для внутренней облицовки стен достигает 16%, а керамических плиток для полов не превышает 4%, обыкновенного глиняного кирпича может быть 8...30%, а плотного бетона – 2...3%; объемное водопоглощение цементного раствора – 25%, гипсовых плит – 36%, мипоры – 98%. Водопоглощение материала зависит от его пористости: чем больше пористость, тем больше водопоглощение. Вода, попавшая в поры материала, резко изменяет его физико-химические свойства, и следовательно, эксплуатационные качества. Она увеличивает его объемную массу и теплопроводность, понижает прочность. Некоторые материалы, в частности, затвердевшие глиняные растворы, разрушаются в воде.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для выполнения лабораторной работы необходимо следующее оборудование:

1. Шкаф сушильный ШСУ.
2. Весы настольные электронные ВСП – 6/1 – 2В.
3. Штангенциркуль ШЦ – III – 400 – 0,1, ГОСТ 166 – 89.
4. Линейка измерительная 300 мм, ГОСТ 427–75.
5. Бак с водой, оснащенный решеткой для размещения кирпичей и нагревателем, с помощью которого можно варьировать температуру воды.

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Образцы (кирпичи) высушить до постоянной массы, термостабилизировать и взвесить.
2. Измерить длину, ширину и высоту образцов.
3. Образцы разместить на решетке с зазорами не менее 3 см между ними в баке с водой, имеющей температуру  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$  и уровень выше верха образцов на 0,05–0,1 м.
4. Образцы выдержать в воде 48 часов (ввиду длительности эксперимента лаборант подготавливает пять кирпичей в насыщенном водой состоянии, масса которых в сухом состоянии определена заранее и записана на каждом кирпиче), после извлечения обтереть влажной тканью и взвесить. Мас-

су воды, вытекшей из образца на чашку весов, включить в массу кирпича, насыщенного водой. Взвешивание каждого образца должно быть закончено не позднее двух минут после его извлечения из воды.

5. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2 – результаты измерений

Показатель, единица измерения		Значение показателя для образца				
		I	II	III	IV	V
Масса сухого образца $m_1$ , кг						
Масса насыщенного образца $m_2$ , кг						
Размеры образца	длина а, м					
	ширина b, м					
	высота с, м					
Объем образца V, см <sup>3</sup>						
Водопоглощение	массовое $W_M$ , %					
	объемное $W_{OB}$ , %					

6. Вычислить массовое и объемное водопоглощение ( $W_M, W_{OB}$ ) по формулам (1) и (2). Водопоглощение кирпича определять как среднее арифметическое результатов испытания пяти образцов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение водопоглощения и поясните его физическую сущность.
2. Перечислите и охарактеризуйте виды водопоглощения.
3. Дайте определение и формулу для расчета массового водопоглощения.
4. Дайте определение и формулу для расчета объемного водопоглощения.
5. Укажите факторы, влияющие на водопоглощение.
6. На какие физические и эксплуатационные свойства материала влияет его водопоглощение?



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ КОНВЕКТИВНОГО ТИПА

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение процесса сушки в сушилке конвективного типа, исследование массы образцов (керамического кирпича) в процессе сушки.

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

На кирпичных заводах сформованные химически стойкие изделия сушат в основном в искусственных сушилках с конвективным обогревом. В качестве теплоносителя используют нагретые газы, получаемые при сжигании топлива в специальных подтопках, или горячий воздух, отбираемый из зоны охлаждения непрерывно действующих или периодических печей при их охлаждении. В последние годы стали применять метод радиационной сушки лампами инфракрасного излучения.

Процесс сушки керамических изделий представляет собой превращение содержащейся в них воды из жидкого состояния в парообразное и последующее удаление ее в окружающую среду. При этом необходимым условием сушки является наличие внешнего источника тепла, нагревающего изделия. При испарении влаги с поверхности изделий влажность поверхностных слоев по сравнению с внутренними слоями уменьшается, и возникает так называемый перепад (градиент) влажности.

При сушке теплота, передаваемая теплоносителем, расходуется на нагрев сухой части и остаточной влаги, а также на испарение части воды, которая удаляется из изделия.

При поверхностном испарении влаги сушка изделий во всем их объеме может происходить, если влага будет перемещаться от центра к их поверхности. Такое перемещение влаги в изделиях протекает под действием различных факторов, и его интенсивность зависит от структуры сформованного изделия, формы связи влаги с массой и от параметров сушки, которыми являются температура, относительная влажность и скорость движения теплоносителя.

По мере того как происходит испарение воды с поверхности изделия в окружающую среду, влажность на поверхности изделия уменьшается, и внутри изделия появляется перепад влажности, который обуславливает перемещение влаги из середины изделия к его поверхности. Влага внутри изделия может перемещаться как в виде жидкости, так и в виде пара.

Перемещение влаги в керамическом изделии может обуславливаться также наличием температурного перепада между центром и поверхностными его слоями, так как такое изделие пронизано мелкими капиллярами и в них влага обладает свойствами перемещаться в направлении потока тепла, т. е. от места более нагретых к менее нагретым.

При конвективном обогреве температура наружных поверхностей высушиваемого изделия больше, чем внутренних, и поэтому влага будет стремиться переместиться от наружных поверхностей к центру изделий.

Такое перемещение влаги под действием температурного градиента противоположно тому, которое происходит под действием влагопроводности. Поэтому оно оказывает тормозящее действие и замедляет удаление влаги из изделия.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Лабораторная работа выполняется с помощью экспериментального стенда (рис. 4), который представляет собой вертикальную трубу 5, внутри которой организована камера конвективной сушки. Регулирование элементов режима сушки обеспечивается нагревателем 4, расположенным в нижней части трубы, и вентилятором искусственной тяги 1, расположенным в верхней части трубы.

Камера конвективной сушки оснащена технологическими элементами для размещения датчиков измерения параметров сушильного агента (скорость, давление, влажность, температура) в шести контрольных точках по высоте камеры, а также окном для выполнения тепловизионной съемки.

Исследуемый образец размещается внутри камеры при помощи регулируемых опор 3. Измерение и регистрацию параметров сушильного агента (воздуха) осуществляли непрерывно в процессе сушки с помощью измерительного комплекса TESTO – 435, тепловизионную съемку – тепловизором

марки IRISYS 1011, взвешивание кирпича производится на весах настольных электронных ВСП – 6/1-2В.

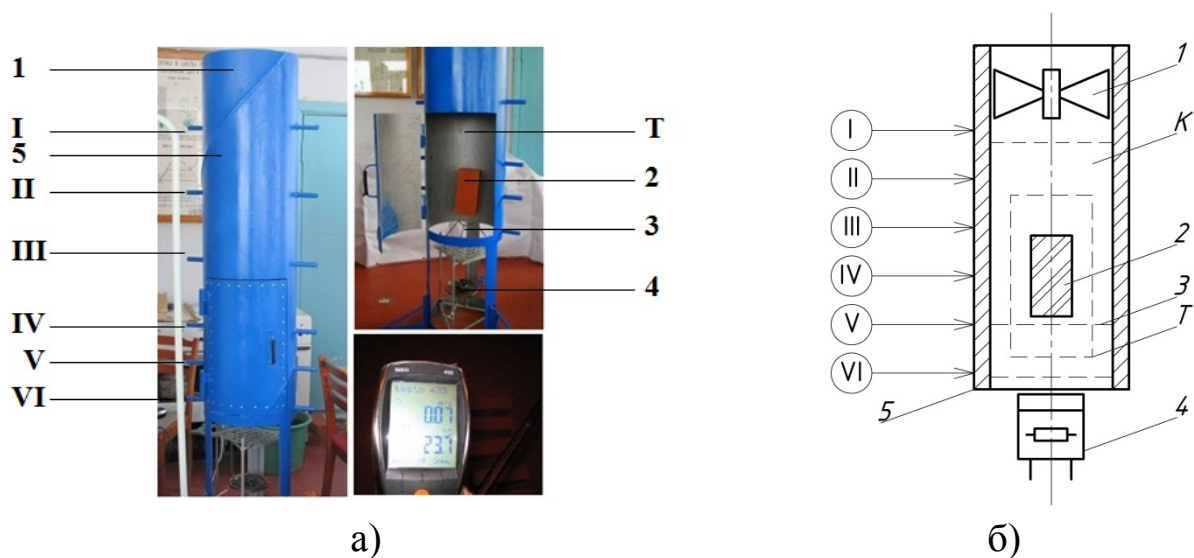


Рис. 4. Общий вид (а) и схема (б) экспериментального стенда для исследования тепло-влажностного состояния кирпича: 1 – вентилятор искусственной тяги; 2 – исследуемый кирпич; 3 – регулируемые опоры; 4 – нагреватель; 5 – труба; I, II, III, IV, V, VI – контрольные точки для регистрации параметров; К – камера конвективной сушки; Т – зона тепловизионной съемки

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Определить параметры помещения, в котором проводится эксперимент: температуру воздуха ( $T$ , °С), атмосферное давление в помещении ( $P$ , МПа), относительную влажность воздуха ( $\varphi$ , %).
2. Образец (керамический кирпич) погрузить на 24 часа в бак с водой.
3. Включить электрическое питание стенда. Прогреть рабочую камеру конвективной сушки до температуры 50°С.
4. После насыщения кирпич поместить в экспериментальный стенд
5. Каждые 15 минут регистрировать:
  - а) параметры сушки в контрольных точках IV и VI: скорость ( $u$ , м/с), влажность ( $\varphi$ , %), температуру теплоносителя ( $t$ , °С);
  - б) массу образца ( $m$ , г);
  - в) тепловизионную картину осушения кирпича.
6. Результаты измерений занести в табл. 3, 4.

Таблица 3 – параметры воздуха в помещении

Температура воздуха $T$ , °С	
Атмосферное давление в помещении $P$ , МПа	
Относительная влажность $\varphi$ , %	

Таблица 4 – результаты измерений

N измерения	Время $\tau$ регистрации параметров, с	Параметры кирпича	Параметры теплоносителя в трубе в верхней контрольной точке IV			Параметры теплоносителя в трубе в нижней контрольной VI			Тепловизионный снимок
			Масса $m$ кирпича, г	$t$ , °С	$\varphi$ , %	$u$ , м/с	$t$ , °С	$\varphi$ , %	

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой процесс сушки керамических изделий?
2. Что называют режимом сушки?
3. Какие последствия вызывает изменение режима сушки?
4. Что используют в качестве теплоносителя для сушки химически-стойких изделий в искусственных сушилках с конвективным обогревом?
5. Какие параметры сушильного агента регистрируются в контрольных точках по высоте камеры конвективной сушки?
6. С какой целью производится тепловизионная съемка при проведении эксперимента?
7. Что представляет из себя стенд, с помощью которого выполняется эксперимент?
8. Вследствие чего возникает перепад влажности при испарении?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение процесса сушки в сушилке с кипящим слоем, определение скорости витания гранул.

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Сушилки с кипящим (взвешенным) слоем используются для сушки мелкодисперсных и сыпучих материалов: продуктов питания, строительных материалов и др. Преимуществом этих сушилок является интенсивное взаимодействие высушиваемого материала и сушильного агента.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

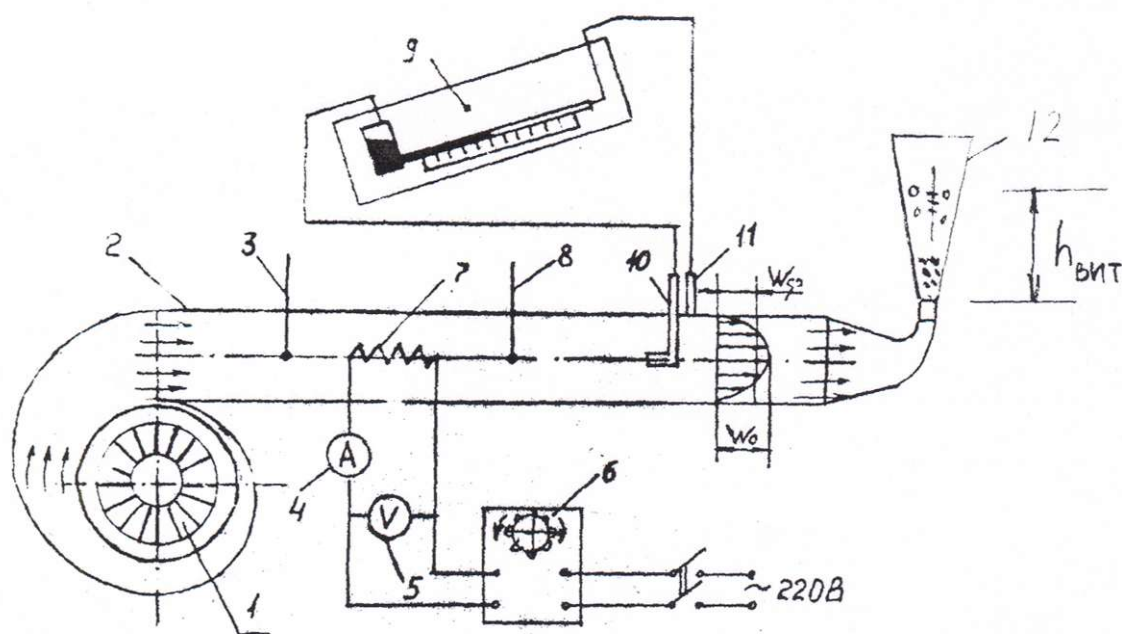


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор; 2 – труба; 3 – термометр; 4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – автотрансформатор (реостат); 7 – электронагреватель; 8 – термометр; 9 – микроманометр; 10 – трубка полного давления; 11 – трубка статического давления; 12 – насадка

Вентилятор 1 нагнетает воздух в металлическую трубу 2, где воздух подогревается нагревателем 7 (режим нагрева устанавливается индивидуально для каждой исследовательской бригады студентов). Мощность, потребляемая нагревателем, измеряется с помощью амперметра 4 и вольтметра 5. Термометры 3 и 8 служат для определения температуры воздуха до и после нагревателя. Динамический напор измеряется с помощью пневмометрических трубок 10, 11 и микроманометра 9. Мощность нагревателя изменяется реостатом 6. Кипящий слой моделируется в насадке 12, параметры кипящего слоя зависят от параметров высушиваемого материала и сушильного агента.

Количество теплоты  $Q$ , Вт, подведенное к сушильному агенту от нагревателя без учета потерь, определяется по формуле

$$Q = N = I \cdot U, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $U$  – разность потенциалов на зажимах нагревателя, В;  $N$  – мощность, потребляемая нагревателем, Вт.

Секундный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ , приведенный к нормальным условиям, определяется по формуле

$$V_{\text{НОРМ}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot W_{\text{СР}} \cdot \frac{P_6}{760} \cdot \frac{273}{T_2}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м ( $d=17,3$  см);  $W_{\text{СР}}$  – средняя по сечению скорость воздуха в трубе, м/с;  $P_6$  – барометрическое давление, мм рт.ст.;  $T_2$  – температура воздуха после нагревателя, К.

Величина средней скорости воздуха  $W_{\text{СР}}$ , м/с определяется по осевой скорости:

$$W_{\text{СР}} = m \cdot W_0, \quad (5)$$

где  $m$  – скоростной коэффициент, определяемый по графику (рис. 6) в зависимости от критерия Рейнольдса  $m = f(\lg Re_0)$ .

Осевая скорость  $W_0$ , м/с находится по величине динамического напора:

$$W_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{P_d}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ , определяемая по таблице физических свойств сухого воздуха в зависимости от температуры  $T_2$ , К;  $P_0 = P'_0 \cdot 9,8066$  – динамический напор, Па;  $P'_0$  – измеряемый в опыте динамический напор, мм рт.ст.

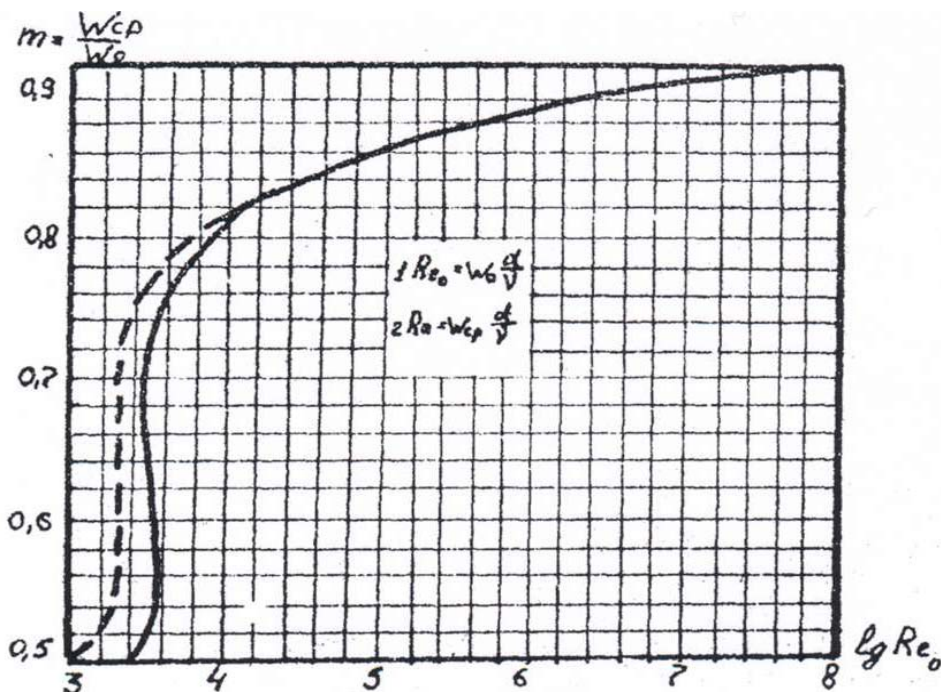


Рис. 6. Зависимость скоростного коэффициента от числа Рейнольдса

Критерий Рейнольдса  $Re_0$  вычисляется по формуле

$$Re_0 = \frac{W_0 \cdot d}{\nu}, \quad (7)$$

где  $W_0$  – осевая скорость воздуха в трубе, м/с;  $d$  – диаметр трубы, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ , определяемый по таблицам свойств воздуха при температуре  $T_2$ .

Гидрогазодинамические параметры работы сушилки с кипящим слоем определяют либо по диаграммам Лященко, либо рассчитывают следующим образом.

Критическая скорость псевдоожижения:

$$W_{KP} = \frac{Ar \cdot \nu}{d_r \cdot (1400 + 5,22\sqrt{Ar})}, \text{ м/с.} \quad (8)$$

Рабочая скорость псевдоожижения:

$$W_{nc} = (1,1 \dots 2,5) \cdot W_{KP}. \quad (9)$$

Скорость витания частиц:

$$W_{\text{ВИТ}} = \frac{Ar \cdot v}{d_r \cdot (18 + 0,61\sqrt{Ar})}, \text{ м/с.} \quad (10)$$

Критерий Архимеда  $Ar$  определяется по следующей формуле:

$$Ar = \frac{g \cdot d_r^3 \cdot (\rho_M \cdot \rho_B)}{v^2 \cdot \rho_B}, \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d_r$  – диаметр частицы (гранулы), м;  $\rho_M$  – плотность высушиваемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_B$  – плотность сушильного агента (воздуха), кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментально-определяемая скорость витания гранул:

$$U_{\text{ВИТ}} = \frac{h}{\tau}, \quad (12)$$

где  $h$  – высота витания гранул, м;  $\tau$  – время витания, с.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Включить вентилятор и электронагреватель экспериментальной установки. После достижения стационарного теплового режима (при постоянных показаниях термометров), измеряют: температуру воздуха до нагревателя, температуру воздуха после нагревателя; силу тока и разность потенциалов, динамический напор, высоту витания частиц, время, барометрическое давление, массу материала до и после сушки. Показания заносят в таблицу 5 (высушиваемый материал должен быть влажным, гранулы предварительно обмерены).

Таблица 5 – результаты измерений

№ пп	T <sub>1</sub> , К	T <sub>2</sub> , К	I, А	U, В	P <sub>д</sub> , мм рт.ст	h, м	τ, с	P <sub>б</sub> , мм рт.ст	M <sub>1</sub> , кг	M <sub>2</sub> , кг

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Определяется количество испаренной влаги, сравниваются экспериментальная и расчетная скорости витания, определяется погрешность эксперимента.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что характеризует критерий Архимеда?
2. Как повысить эффективность работы сушилки с кипящим слоем?
3. Что характеризует критерий Лященко?
4. Что характеризует критическая скорость псевдооживления?
5. Что такое скорость витания частиц?
6. Почему сушилка называется «сушилка с кипящим слоем», а кипящей жидкости в ней нет?
7. Что характеризует критерий Федорова?
8. Каким критериальным уравнением описывается теплообмен в сушилке с кипящим слоем?
9. Как классифицируются сушилки с кипящим слоем?
10. Как реализовать гранулирование в сушилке с кипящим слоем?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование работы сушилки периодического действия (сушильного шкафа с электронагревом), определение влияния режима нагрева на расход испаренной влаги.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 7.

#### МЕТОДИКА

Подведенный тепловой поток определяется по формуле

$$Q = \frac{V_{\text{шк}} \cdot c_v \cdot (t_{\text{шк}} - t_{\text{н1}})}{\tau}, \quad (13)$$

где  $V_{\text{шк}}$  – объем сушилки периодического действия,  $\text{м}^3$ ;  $c_v$  – объемная теплоемкость сушильного агента,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{н1}}$  – температура начала процесса сушки (воздуха до сушки),  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{шк}}$  – температура сушильного агента в сушилке,  $^\circ\text{C}$ .

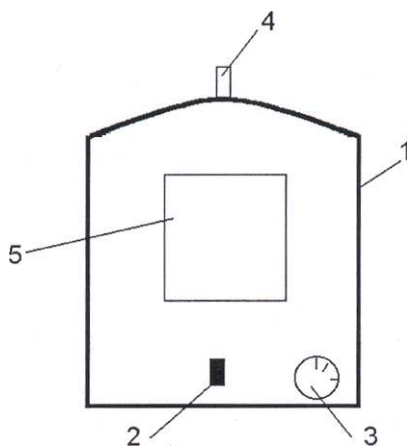


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1 – сушилка периодического действия; 2 – выключатель; 3 – переключатель режимов сушки; 4 – термометр; 5 – смотровое окно

Количество испаренной влаги определяется по формуле

$$M = M_1 - M_2, \quad (14)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – масса образца до и после сушки, кг.

Температура образца:

$$t_0 = t_{\text{шк}} - \frac{Q}{c - c_B}, \quad (15)$$

где  $c_B$  – теплоемкость влаги при температуре  $t_{\text{шк}}$ , кДж/(кг·°С).

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{Q}{F_0(t_{\text{шк}} - t_0)}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}). \quad (16)$$

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Включить сушильную камеру в сеть. Образец для сушки, предварительно обмеренный и взвешенный, поместить в сушильную камеру. После сушки образец вынуть из сушильной камеры, изменить размеры высушенного образца и его массу.

Работа сушильной установки исследуется при нескольких режимах работы нагревателя и различном времени сушки образца (деревянный брусок или прямоугольный образец с другими свойствами).

Выбор режима подогрева осуществляется с помощью переключателя 3.

Измеряемые величины: вес образца до и после сушки, размеры образца до и после сушки, температура воздуха в помещении; температура сушильного агента внутри сушилки периодического действия; барометрическое давление; время сушки, влажность воздуха (по климатическим данным).

Показания заносят в таблицу 6.

Таблица 6 – результаты измерений

№ пп	$t_{\text{н1}}$ , К	$t_{\text{шк}}$ , К	$V_{\text{шк}}$ , м <sup>3</sup>	$\tau$ , с	$P_6$ , мм рт.ст	$M_1$ , кг	$M_2$ , кг	$M$ , кг	$t_0$ , К	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

По результатам работы строится график зависимости температуры образца от времени прогрева для различных режимов работы сушилki.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируются сушильные установки?
2. Какие теплообменные аппараты периодического действия выделяют?
3. Как классифицируются теплоносители теплообменных аппаратов?
4. Что показывает коэффициент теплопередачи?
5. Чем теплопередача отличается от теплоотдачи?
6. Как определить КПД теплообменного аппарата?
7. Как повысить КПД теплообменного аппарата?
8. Запишите уравнение теплового баланса сушилки периодического действия.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В ВАКУУМНОЙ СУШИЛКЕ

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение процесса сушки в вакуумной сушилке, исследование влияния глубины вакуума на расход испаренной влаги.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 8.

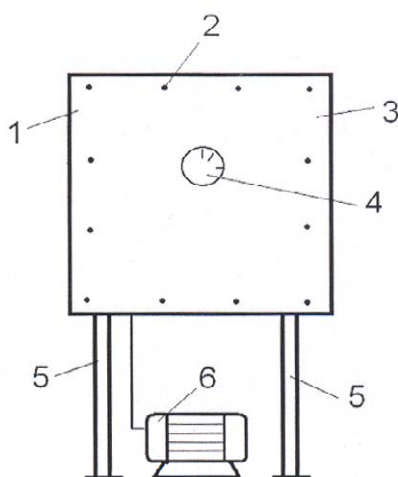


Рис. 8. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная сушилка; 2 – крепеж; 3 – крышка; 4 – вакуумметр; 5 – опора; 6 – вакуум-насос с электродвигателем

Плотность потока испаренной влаги  $q_m$ , кг/(м<sup>2</sup>ч), во влажном теле определяется следующим образом:

$$q_m = -k_{\Delta\theta} \cdot \Delta\theta, \quad (17)$$

где  $k_{\Delta\theta}$  – коэффициент массопроводности;  $\Delta\theta$  – градиент потенциала переноса массы.

Поток массы влаги, вызванный градиентом давления, подобен фильтрации (полярный перенос), и поэтому плотность потока испаренной влаги может быть рассчитана согласно закону Дарси:

$$q_{m\Delta p} = -k_{\Delta p} \cdot \Delta p, \quad (18)$$

где  $k_{\Delta p}$  – коэффициент паропроницаемости образца;  $\Delta p = p_1 - p_0$  – градиент давления, Па;  $p_1$  – давление внутри сушильной камеры, Па;  $p_0$  – атмосферное давление, Па.

Так как поток массы влаги определяется выражением  $q_{m\Delta p} = \frac{M}{F \cdot \tau}$ , определяем количество испаренной влаги, кг;

$$M_{\text{теор}} = q_{m\Delta p} \cdot A \cdot \tau.$$

где  $F$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время сушки, ч.

Определяется погрешность экспериментальных исследований:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{теор}} - M_{\text{экс}}}{M_{\text{теор}}} \cdot 100\% ,$$

где  $M_{\text{экс}}$  определяется по разности масс образца до и после сушки.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа сушильной установки исследуется для нескольких режимов работы и различном времени сушки образца (деревянный брусок или угольный образец других свойств). Режим сушки зависит от высушиваемого образца и глубины создаваемого вакуума.

Измеряемые величины: вес образца до и после сушки, размеры образца до и после сушки, температура воздуха в помещении; температура воздуха внутри камеры; барометрическое давление; давление внутри вакуумной сушилки, время сушки, влажность воздуха (по климатическим данным).

Показания заносят в таблицу 7.

Таблица 7 – результаты измерений

№ пп	$t_{\text{в}}$ , К	$V_{\text{шк}}$ , м <sup>3</sup>	$P_0$ , мм рт.ст	$P_1$ , Па	$P_2$ , Па	$M_1$ , кг	$M_2$ , кг	$\tau$ , с	$\Delta p$ , Па	$F$ , м <sup>2</sup>

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведенных исследований строятся графики зависимости количества испаренной влаги от глубины вакуума и от времени сушки для различных типов высушиваемых образцов.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое коэффициент массопереноса?
2. Как записать уравнение сохранения масс для вакуумной сушки?
3. Что характеризует коэффициент массопроводности?
4. Как определяется коэффициент паропроницаемости материала?
5. Как повысить эффективность вакуумной сушки?
6. Как ограничивается глубина вакуума в вакуумных аппаратах?
7. Что такое градиент потенциала переноса масс?
8. Что влияет на величину коэффициента паропроницаемости материала?
9. Какие составляющие определяют погрешность экспериментальных исследований?
10. Как записывается уравнение энергетического баланса вакуумной сушки?

**Пример оформления титульного листа отчета**

Министерство образования и науки Российской Федерации

«Ульяновский государственный технический университет»

Кафедра «Теплоэнергетика»

**ОТЧЕТ**

по лабораторной работе №1.

.....

Выполнил: студент гр. ТЭд – 41

Иванов И.И.

Проверил: Федоров Р.В.

Ульяновск 2012



## СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков, А. В. Теория тепло-массопереноса. – М. : Энергия, 1963. – 486 с.
2. Назмеев, Ю. Г. Теплообменные аппараты ТЭС : учебное пособие для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 288 с.
3. Лыков, А. В. Теория сушки. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / под ред. чл.-корр. РАН А. В. Клименко и проф. В. М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 632 с.
5. Промышленные теплообменные процессы и установки : учебник для вузов / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов и др.; под ред. А. М. Бакластова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
6. Теория и техника теплофизического эксперимента / Ю. Ф. Гортышов, Ф. Н. Дресвянников, Н. Н. Ковальногов и др.; под ред. В. К. Щукина. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 448 с.
7. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Теплофизические свойства воды

Температура T, °C	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость c, кДж/(кг·K)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·K)
0	999,84	4,2176	0,5610
10	999,70	4,1921	0,5800
20	998,21	4,1818	0,5984
30	995,65	4,1784	0,6154
40	992,22	4,1785	0,6305
50	988,03	4,1806	0,6435
60	983,20	4,1843	0,6543
70	977,78	4,1895	0,6631
80	971,82	4,1963	0,6700
90	965,35	4,2050	0,6753
100	958,40	4,2159	0,6791

### Теплофизические свойства воздуха

Температура T, °C	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость c, кДж/(кг·K)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·K)	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с
0	1,293	1,005	2,43	13,30
20	1,205	1,005	2,57	15,11
40	1,127	1,005	2,71	16,97
60	1,067	1,009	2,85	18,90
80	1,000	1,009	2,99	20,94
100	0,946	1,009	3,14	23,06

### Теплофизические свойства керамического кирпича

Наименование	Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость c, кДж/(кг·K)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·K)
Кирпич полнотелый	1975 - 2225	0,9	0,5 - 0,7
Кирпич пустотелый	1375 - 1625		

Учебное электронное издание

КОВАЛЬНОГОВ Владислав Николаевич

ФЕДОРОВ Руслан Владимирович

ЦЫНАЕВА Анна Александровна

**Тепломассобменное оборудование промышленных  
предприятий**

Сборник учебно-исследовательских лабораторных работ

Редактор Н. А. Евдокимова

Объем данных 1,04 Мб. ЭИ № 111.

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.

Тел.: (8422) 778-113.

Е-mail: [venec@ulstu.ru](mailto:venec@ulstu.ru)

<http://www.venec.ulstu.ru>