

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**И. А. Цубанов, В. А. Коротинский, А. Г. Цубанов**

**ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое  
обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)»*

Минск  
БГАТУ  
2020

УДК 621.1(07)  
ББК 31.31я7  
Ц83

Рецензенты:

кафедра «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии»  
Белорусского национального технического университета  
(доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой *В. Г. Баитовой*);  
директор ООО «Лаборатория ПВТи» *А. В. Михадюк*

**Цубанов, И. А.**  
Ц83 Теплотехнологии. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / И. А. Цубанов, В. А. Коротинский, А. Г. Цубанов. – Минск : БГАТУ, 2020. – 56 с.  
ISBN 978-985-25-0069-2.

Содержит материалы для лабораторных работ по исследованию теплообменных аппаратов, отопительных приборов и холодильных установок и процесса конвективной сушки.

Для студентов энергетических специальностей, получающих высшее образование первой степени.

УДК 621.1(07)  
ББК 31.31я7

ISBN 978-985-25-0069-2

© БГАТУ, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	5
Лабораторная работа № 1 Теплообменные аппараты в технологических линиях сельскохозяйственных предприятий.....	6
Лабораторная работа № 2 Исследование распределения температур в теплообменном аппарате .....	14
Лабораторная работа № 3 Отопительные приборы.....	21
Лабораторная работа № 4 Исследование отопительного прибора.....	30
Лабораторная работа № 5 Исследование холодильной установки .....	36
Лабораторная работа № 6 Исследование процесса конвективной сушки .....	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	50
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	51

## ВВЕДЕНИЕ

Успешное воплощение в жизнь задач, стоящих перед работниками сельскохозяйственной отрасли, во многом зависит от решения инженерных вопросов, среди которых рациональное использование энергии. В общем энергетическом балансе сельскохозяйственного производства тепловая энергия играет ведущую роль.

Большое количество теплоты расходуется на обеспечение необходимых параметров микроклимата в животноводческих помещениях и хранилищах, на отопление и вентиляцию зданий, на сушку сельскохозяйственной продукции и приготовление кормов. Изучение закономерностей теплообмена в технологических процессах сельскохозяйственного производства, знание теплотехнологического оборудования поможет специалисту определить оптимальные методы управления указанными процессами. Это позволит успешно решать важные для страны задачи эффективного и экономичного расходования топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве.

*Цель учебной дисциплины «Теплотехнологии»* – формирование и развитие компетенций по эффективному использованию теплотехнологического оборудования и энергетических установок при производстве и хранении сельскохозяйственной продукции.

*Задачи учебной дисциплины:*

– изучить закономерности тепловых процессов для определения и использования на практике наиболее эффективных теплотехнологических процессов и оборудования;

– ознакомиться со способами и средствами преобразования исходных материалов и сырья в заданный товарный продукт на основе изменения их теплового состояния.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Студент допускается к выполнению лабораторных работ после ознакомления с правилами техники безопасности в лабораториях кафедры и получения разрешения преподавателя.

Студент обязан знать и строго соблюдать правила пожарной и электрической безопасности.

В процессе подготовки к лабораторной работе студенту необходимо изучить методические указания, привести на бланке отчета схему лабораторной установки и таблицу для записи результатов измерения.

При выполнении лабораторных работ студент должен действовать в строгом соответствии с методическими указаниями и не допускать самовольных действий с приборами, пускорегулирующей аппаратурой и другими элементами установок.

*Запрещается:*

- включать и выключать лабораторные установки без разрешения преподавателя;

- вносить изменения в схемы установок, отключать электрические провода, производить разборку и ремонт оборудования лабораторных установок, переставлять приборы и оборудование;

- прикасаться к элементам оборудования, которые могут находиться под напряжением;

- прикасаться к нагретым поверхностям и движущимся частям оборудования;

- перекрывать вход воздуха в вентиляторы, изменять положение заслонок в шибах;

- облакочиваться или ставить ноги на электродвигатели, вентиляторы и другое оборудование.

При обнаружении неисправностей или повреждений лабораторного оборудования студент обязан немедленно сообщить об этом преподавателю.

Студент должен знать, где находится аппаратура, с помощью которой включается (выключается) оборудование, производится пуск (остановка) вентиляторов и насосов.

По окончании выполнения экспериментальной части лабораторной работы студент должен показать преподавателю таблицу с результатами измерения.

При нарушении правил техники безопасности студент отстраняется от выполнения лабораторных работ и может быть допущен к нему после собеседования с преподавателем по правилам выполнения работ.

## Лабораторная работа № 1

### ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Цель работы:** изучить назначение, классификацию и конструктивные особенности теплообменных аппаратов; определить средний температурный напор и коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата.

**Материальное обеспечение:** лабораторная установка по исследованию теплообменного аппарата.

#### Основные сведения

*Теплоносителями* являются движущиеся среды, участвующие в переносе теплоты. *Теплообменным аппаратом* называется устройство, в котором осуществляется теплообмен между теплоносителями (горячим и холодным).

Типы и конструкции теплообменных аппаратов весьма разнообразны. С учетом характерных особенностей рабочих процессов и конструкции теплообменники можно классифицировать:

- по назначению (подогреватели, холодильники, испарители, конденсаторы);
- по виду теплоносителей (паро-жидкостные, жидкостно-жидкостные, газо-жидкостные, газо-газовые);
- по характеру температурного режима (непрерывного и периодического действия);
- по принципу действия (смесительные и поверхностные).

С точки зрения энергоэффективности предпочтение следует отдавать *теплообменникам непрерывного действия*, т. к. в этих аппаратах теплота расходуется на нагрев конструкции только один раз – в начале работы. В теплообменниках периодического действия эти затраты теплоты будут наблюдаться в начале каждого рабочего цикла.

В *смесительных теплообменных аппаратах* теплообмен происходит при непосредственном соприкосновении и перемешивании теплоносителей. Примером таких теплообменников является инжектор пастеризационно-охладительной установки, в котором происходит смешивание водяного пара с подогреваемой водой.

В *поверхностных теплообменных аппаратах* теплоносители разделены поверхностью и непосредственно друг с другом не контактируют. Эти теплообменники подразделяют на регенеративные и рекуперативные.

В регенеративных теплообменниках (рис. 1.1) горячий и холодный теплоносители поочередно омывают теплоаккумулирующую насадку, выполненную из керамических, металлических и других элементов. При контакте с горячим теплоносителем насадка нагревается, т. е. аккумулирует теплоту. Перемещаясь в зону холодного теплоносителя, она отдает теплоту ему.

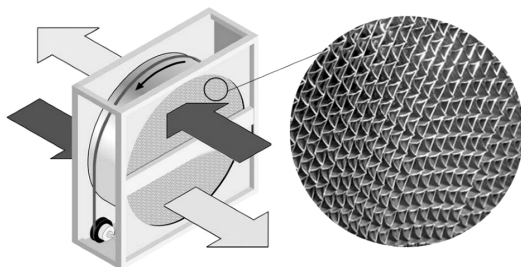


Рис. 1.1. Регенеративный вращающийся теплообменник

Широкое распространение в сельском хозяйстве получили рекуперативные теплообменники, в которых теплообмен между теплоносителями происходит через разделяющую их стенку (поверхность теплообмена). Данные аппараты можно классифицировать:

- по схеме движения теплоносителей (прямоточные, противоточные, перекрестноточные и смешанные);
- по материалу теплообменной поверхности (металлические и неметаллические);
- по числу ходов теплоносителя (одноходовые и многоходовые);
- по конфигурации теплообменной поверхности (кожухотрубчатые и пластинчатые).

В некоторых случаях с целью снижения металлоемкости металл заменяют более дешевыми материалами. Например, у стеклотрубного теплообменника теплообменная поверхность набрана из стеклянных труб.

В *кожухотрубчатых теплообменных аппаратах* (рис. 1.2) теплообменная поверхность выполнена из рядов трубок, собранных

при помощи трубных решеток в пучок и заключенных в кожух (обычно цилиндрической формы). Концы труб для обеспечения плотности их соединения с трубными решетками развальцовывают или приваривают. Один теплоноситель движется в трубках, а другой – по межтрубному пространству.

В многоходовом теплообменнике один из теплоносителей движется по нескольким ходам, последовательно изменяя направление своего движения. Характерным конструктивным признаком такого аппарата является наличие перегородок, что позволяет уменьшить площадь живого сечения для прохода теплоносителя и увеличить его скорость. За счет этого возрастает интенсивность теплообмена и, следовательно, тепловая мощность теплообменника при той же площади поверхности трубок.

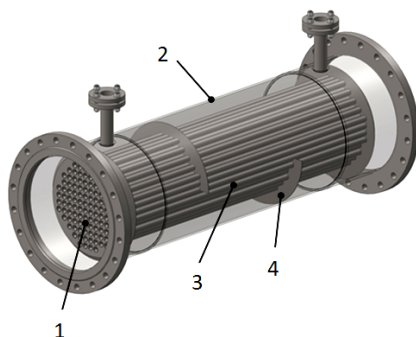


Рис. 1.2. Кожухотрубчатый многоходовой теплообменник:  
1 – трубная решетка; 2 – кожух; 3 – трубный пучок; 4 – перегородка

К достоинствам кожухотрубчатых теплообменников можно отнести простоту конструкции, широкий диапазон рабочих температур и давлений, возможность тепловой обработки вязких сред. Недостатки – высокая металлоемкость, большие габариты, сложность очистки теплообменной поверхности, необходимость тепловой изоляции.

*Пластинчатые теплообменники* (рис. 1.3) состоят из пакета гофрированных пластин, между которыми образуются щелевидные каналы для прохода теплоносителей. Уплотнение каналов достигается за счет резиновых прокладок. Пластины штампуют из оцинкованной или легированной стали.



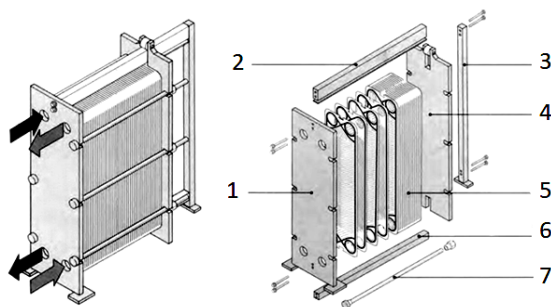


Рис. 1.3. Пластинчатый теплообменник:

1 – опорная плита; 2, 6 – верхняя и нижняя штанги; 3 – стойка; 4 – прижимная плита;  
5 – пакет гофрированных пластин с прокладками; 7 – стяжные шпильки

К достоинствам пластинчатых теплообменников относятся компактность, малая металлоемкость и отсутствие тепловой изоляции, а их разборная конструкция облегчает процесс очистки теплообменной поверхности. Недостатки – диапазон значений допускаемой температуры теплоносителей ограничен термостойкостью резиновых прокладок, нарушение герметичности каналов из-за старения уплотнителей, высокая стоимость.

К числу общих требований, предъявляемых к конструкции теплообменных аппаратов, можно отнести простоту конструкции, компактность, малую металлоемкость, долговечность, надежность и безопасность эксплуатации, низкую стоимость, высокую производительность и экономичность.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 1.4) состоит из электроводонагревателя ЭВО-9, циркуляционного насоса WILO Star RS25/4, расширительного бака Reflex N и теплообменного аппарата. Теплообменник состоит из двух секций. Площадь поверхности теплообмена одной секции – 0,09 м<sup>2</sup>. Горячий теплоноситель (вода) циркулирует по замкнутому контуру, проходя по внутренней трубе отдельных секций. Измерение расхода горячего теплоносителя осуществляется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВГ-15. Холодный теплоноситель (вода) поступает из водопровода в пространство между наружной и внутренней трубами каждой из секций теплообменника. Расход

холодного теплоносителя измеряется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВХ-15. Для измерения температур теплоносителей предусмотрены биметаллические торцевые термометры ТБП-100.

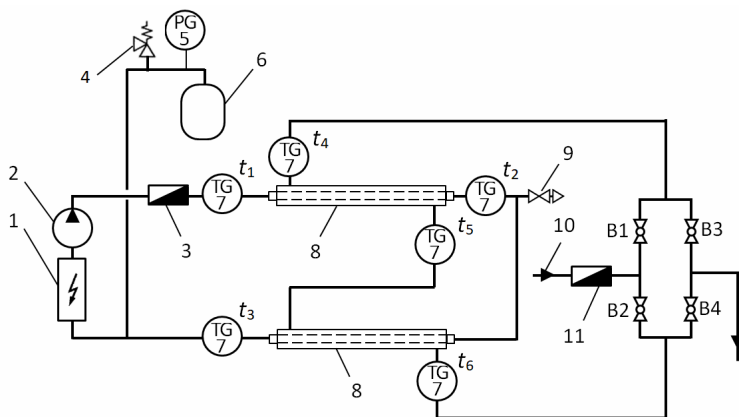


Рис. 1.4. Схема лабораторной установки:

- 1 – электроводонагреватель; 2 – циркуляционный насос;  
 3, 11 – счетчик горячей и холодной воды; 4 – предохранительный клапан;  
 5 – манометр; 6 – расширительный бак; 7 – термометр;  
 8 – секции теплообменника; 9 – воздушный кран; 10 – водопровод

Для изменения схемы движения теплоносителей предусмотрены шаровые краны В1–В4.

Расширительный бак предназначен для компенсации температурных расширений воды в системе. В установке используется закрытый подвесной бак с упругой мембраной, разделяющей две среды – воду и инертный газ. Система находится под избыточным давлением, которое контролируется с помощью манометра. Для аварийного сброса воды при повышении давления выше номинального предусмотрен предохранительный клапан.

Удаление воздуха из системы осуществляется с помощью воздушного крана (крана Маевского).

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Установить прямоточную схему движения теплоносителей. Для этого открыть шаровые краны В1, В4 и закрыть краны В2, В3.

3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений.

Таблица

Результаты измерений

Время, ч-мин	Температура, °С						$V_{сч1}$ , м <sup>3</sup>	$V_{сч2}$ , м <sup>3</sup>	Примечание
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$			

В графе «Примечание» привести наименование схемы движения теплоносителей.

4. Через каждые 5 мин записывать в таблицу показания измерительных приборов. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

### Обработка результатов измерений

Построить в масштабе температурный график при стационарном тепловом режиме.

Вычислить средний температурный напор  $\Delta t_{ср}$ , °С:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta t_б$  и  $\Delta t_м$  – большие и меньшие температурные напоры на концах теплообменного аппарата, °С.

Определить массовый расход теплоносителей  $G$ , кг/с:

$$G = \frac{\rho DV_{сч}}{\tau}, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{сч}$  – разность показаний счетчика, м<sup>3</sup>, за время измерения  $\tau$ , с.

Массовый расход горячего теплоносителя обозначить индексом «1», а холодного – индексом «2».

Для воды удельную изобарную теплоемкость принять равной 4,2 кДж/(кг·°С).

Рассчитать тепловой поток, отдаваемый в теплообменнике горячим теплоносителем,  $\Phi_1$ , кВт:

$$\Phi_1 = c_{p1} G_1 (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \quad (1.3)$$

где  $c_{p1}$  – удельная изобарная теплоемкость горячего теплоносителя, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{вх}}$  и  $t_{\text{вых}}$  – значения температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник и на выходе из него, °С.

Определить тепловой поток на нагрев в теплообменнике холодного теплоносителя  $\Phi_2$ , кВт:

$$\Phi_2 = c_{p2} G_2 (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \quad (1.4)$$

где  $c_{p2}$  – удельная изобарная теплоемкость холодного теплоносителя, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{вх}}$  и  $t_{\text{вых}}$  – значения температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника и на входе в него, °С.

Найти КПД теплообменника:

$$\eta = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}.$$

Определить коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$k = \frac{\Phi_2 \cdot 10^3}{F D t_{\text{ср}}}, \quad (1.5)$$

где  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение расширительного бака в составе лабораторной установки?
2. Каково назначение предохранительного клапана?

3. Каково назначение крана Маевского?
4. Что называется теплообменным аппаратом?
5. Как классифицируются теплообменные аппараты с учетом характерных особенностей рабочих процессов и конструкции?
6. Как классифицируются рекуперативные теплообменники?
7. Каковы особенности конструкции кожухотрубчатых теплообменников?
8. Каковы достоинства и недостатки кожухотрубчатых теплообменников?
9. Каковы особенности конструкции пластинчатых теплообменников?
10. Каковы достоинства и недостатки пластинчатых теплообменников?
11. Какие общие требования предъявляются к конструкции теплообменных аппаратов?

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

**Цель работы:** изучить виды тепловых расчетов теплообменных аппаратов; определить коэффициент теплопередачи теплообменника и сравнить экспериментальные значения конечных температур теплоносителей с расчетными.

**Материальное обеспечение:** лабораторная установка по исследованию теплообменного аппарата.

#### Основные сведения

Тепловой расчет теплообменного аппарата может быть *проектным* (конструкторским), в результате которого находят требуемую площадь поверхности теплообмена, и *проверочным*, при котором устанавливается режим работы аппарата и определяются конечные температуры теплоносителей. Тепловой расчет сводится к совместному решению уравнений теплового баланса и теплопередачи. Эти уравнения лежат в основе любого теплового расчета.

Уравнение теплового баланса при неизменном агрегатном состоянии теплоносителей имеет вид:

$$c_{p1}G_1(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) = c_{p2}G_2(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \quad (2.1)$$

где  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – значения удельной изобарной теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, кДж/(кг·°С);

$G_1$  и  $G_2$  – значения массового расхода горячего и холодного теплоносителей, кг/с;

$t_{\text{вх}}$  и  $t_{\text{вых}}$  – значения температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в теплообменный аппарат, °С;

$t_{\text{вх}}$  и  $t_{\text{вых}}$  – значения температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата, °С;

$\eta$  – КПД теплообменного аппарата.

Уравнение теплопередачи используют для определения требуемой площади поверхности теплообмена  $F$ , м<sup>2</sup>:

$$F = kFDt_{cp}, \quad (2.2)$$

где  $\Phi$  – тепловая мощность теплообменного аппарата, Вт;  
 $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор, °С.

Средний температурный напор при противотоке при прочих равных условиях всегда больше, чем при прямотоке. Это значит, что при одной и той же поверхности теплообмена и одинаковых значениях крайней температуры теплоносителей при противотоке возрастает тепловая мощность теплообменного аппарата. С другой стороны, при заданной тепловой мощности противоточный теплообменный аппарат получается более компактным, чем прямоточный.

Недостатком противоточной схемы движения теплоносителей являются более тяжелые температурные условия для материала поверхности теплообмена. При высоких температурах рабочих сред отдельные участки поверхности теплообмена омываются с обеих сторон теплоносителями с наиболее высокой температурой, что может привести к температурным деформациям материала стенки. Поэтому в этих условиях используют прямоток, который позволяет обеспечить более «мягкий» температурный режим.

В тепловых расчетах важное значение имеет величина, называемая расходной теплоемкостью  $C$ , кВт/°С:

$$C = c_p G, \quad (2.3)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°С), для воды принять  $c_p = 4,2$  кДж/(кг·°С);

$G$  – массовый расход данного теплоносителя, кг/с.

Расходная теплоемкость определяет количество теплоты, которое содержит теплоноситель заданного расхода.

Распределение температур в теплообменном аппарате зависит от природы теплоносителей, их начальных температур и расходов, а также от коэффициента эффективности.

Коэффициент эффективности определяет долю действительной тепловой мощности теплообменника от максимально возможной. Эффективность теплообменника зависит от числа единиц переноса теплоты  $N$  (безразмерной формы коэффициента теплопередачи), соотношения значений расходной теплоемкости теплоносителей  $\omega = C_{\min} / C_{\max}$  и схемы их движения.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 2.1) состоит из электроводонагревателя ЭВО-9, циркуляционного насоса WIL0 Star RS25/4, расширительного бака Reflex N и теплообменного аппарата. Теплообменник состоит из двух секций. Площадь поверхности теплообмена одной секции – 0,09 м<sup>2</sup>. Горячий теплоноситель (вода) циркулирует по замкнутому контуру, проходя по внутренней трубе отдельных секций. Измерение расхода горячей воды осуществляется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВГ-15. Холодный теплоноситель (вода) поступает из водопровода в пространство между наружной и внутренней трубами каждой из секций теплообменника. Расход холодной воды измеряется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВХ-15. Для измерения температур теплоносителей предусмотрены биметаллические торцевые термометры ТБП-100.

Для изменения схемы движения теплоносителей предусмотрены шаровые краны В1–В4.

Расширительный бак предназначен для компенсации температурных расширений воды в системе. В установке используется закрытый подвесной бак с упругой мембраной, разделяющей две среды – воду и инертный газ. Система находится под избыточным давлением, которое контролируется с помощью манометра. Для аварийного сброса воды при повышении давления выше номинального предусмотрен предохранительный клапан.

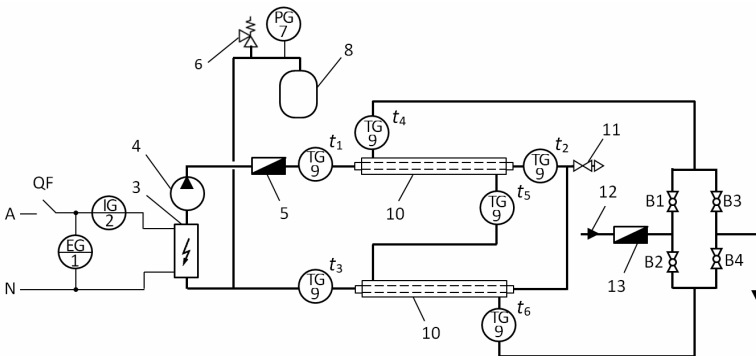


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки:

- 1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – электроводонагреватель;
- 4 – циркуляционный насос; 5, 13 – счетчики горячей и холодной воды;
- 6 – предохранительный клапан; 7 – манометр; 8 – расширительный бак;
- 9 – термометры; 10 – секции теплообменника; 11 – воздушный кран; 12 – водопровод



Удаление воздуха из системы осуществляется с помощью воздушного крана (крана Маевского).

Для измерения мощности электроводонагревателя предусмотрены амперметр и вольтметр.

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. По указанию преподавателя установить схему движения теплоносителей. Для прямотока открыть шаровые краны В1, В4 и закрыть краны В2, В3, а для противотока открыть шаровые краны В2, В3 и закрыть краны В1, В4.
3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений.

Таблица

Результаты измерений

Время, ч-мин	U, В	I, А	Температура, °С						V <sub>сч1</sub> , М <sup>3</sup>	V <sub>сч2</sub> , М <sup>3</sup>	Примечание
			t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>			

В графе «Примечание» привести наименование схемы движения теплоносителей. Последнюю строку в таблице оставить для записи расчетных значений температуры с указанием в графе «Примечание» против этой строки «Расчетные значения».

4. Через каждые 5 мин записывать показания измерительных приборов. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

### Обработка результатов измерений

Построить в масштабе температурный график при стационарном тепловом режиме.

Вычислить средний температурный напор  $\Delta t_{cp}$ , °С:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{6}} - \Delta t_{\bar{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{6}}}{\Delta t_{\bar{M}}}}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta t_{\bar{6}}$  и  $\Delta t_{\bar{M}}$  – больший и меньший температурные напоры на концах теплообменного аппарата, °С.

Определить массовый расход теплоносителей  $G$ , кг/с:

$$G = \frac{\rho DV_{\text{сч}}}{t}, \quad (2.5)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{\text{сч}}$  – разность показаний счетчика, м<sup>3</sup>, за время измерения  $t$ , с.

Массовый расход горячего теплоносителя обозначить индексом «1», а холодного – индексом «2».

Рассчитать тепловой поток, отдаваемый в теплообменнике горячим теплоносителем  $F_1$ , кВт:

$$F_1 = c_{p1} G_1 (t_{\text{г}} - t_{\text{х}}), \quad (2.6)$$

где  $c_{p1}$  – удельная изобарная теплоемкость горячего теплоносителя, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{г}}$  и  $t_{\text{х}}$  – значения температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник и на выходе из него, °С.

Определить тепловой поток на нагрев в теплообменнике холодного теплоносителя  $F_2$ , кВт:

$$F_2 = c_{p2} G_2 (t_{\text{г}} - t_{\text{х}}), \quad (2.7)$$

где  $c_{p2}$  – удельная изобарная теплоемкость холодного теплоносителя, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{г}}$  и  $t_{\text{х}}$  – значения температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника и на входе в него, °С.

Найти КПД теплообменника:

$$h = \frac{F_2}{F_1}.$$

Сравнить полученное значение теплового потока  $F_1$  с определенным по показаниям вольтметра и амперметра  $F_{\text{ф}}$ , кВт:

$$F_{\text{ф}} = UI \times 10^{-3}.$$

Определить коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$k = \frac{F_2 \times 10^3}{F D t_{cp}}, \quad (2.8)$$

где  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Вычислить расходную теплоемкость теплоносителей  $C_1$  и  $C_2$  по формуле (2.3).

Определить текущее значение числа единиц переноса теплоты  $N_x$ :

$$N_x = \frac{k F_x}{C_{\min} \times 10^3}, \quad (2.9)$$

где  $F_x$  – площадь поверхности теплообмена от места входа теплоносителя в теплообменник до расчетного сечения, м<sup>2</sup>;

$C_{\min}$  – наименьшее значение расходной теплоемкости из  $C_1$  и  $C_2$ , кВт/°С.

Найти соотношение расходных теплоемкостей теплоносителей  $w$ .

Рассчитать текущий коэффициент эффективности:

– при прямотоке:

$$e_x = \frac{1 - \exp[-N_x(1+w)]}{1+w};$$

– при противотоке:

$$e_x = \frac{1 - \exp[-N_x(1-w)]}{1 - w \exp[-N_x(1-w)]}.$$

Выполнить расчет значений температуры горячего  $t_{гх}$  и холодного  $t_{хх}$  теплоносителей после каждой секции, °С:

$$t_{гх} = t_{гг} - (t_{гг} - t_{гд}) e_x \frac{C_{\min}}{C_1};$$

$$t_{хх} = t_{хд} + (t_{гг} - t_{гд}) e_x \frac{C_{\min}}{C_2}.$$

Рассчитанные значения температуры записать в последней строке таблицы результатов измерений и нанести на ранее построенный температурный график.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково назначение крана Маевского в составе лабораторной установки?
2. Каково назначение предохранительного клапана?
3. Каково назначение расширительного бака в составе лабораторной установки?
4. Какие существуют виды тепловых расчетов теплообменных аппаратов?
5. Какие задачи решаются посредством тепловых расчетов теплообменных аппаратов?
6. Что называется расходной теплоемкостью теплоносителя?
7. Что относится к достоинствам противоточной схемы движения теплоносителей?
8. В каких случаях следует предусматривать прямоточную схему движения теплоносителей?
9. Что характеризует коэффициент эффективности?
10. От чего зависит эффективность теплообменника?
11. От каких факторов зависит распределение температур в теплообменном аппарате?

## Лабораторная работа № 3

### ОТОПИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

**Цель работы:** изучить назначение и конструктивные особенности отопительных приборов; определить тепловой поток и коэффициент теплопередачи алюминиевого радиатора.

**Материальное обеспечение:** лабораторный стенд «Отопительные приборы», лабораторная установка по исследованию отопительного прибора.

#### Основные сведения

Отопительные приборы являются одним из основных элементов системы отопления и предназначены для передачи теплоты от теплоносителя в обогреваемые помещения.

К отопительным приборам предъявляется ряд *требований*:

– теплотехнические требования сводятся к обеспечению наибольшего теплового потока, передаваемого в помещение через единицу площади прибора при прочих равных условиях (расход и температура теплоносителя, температура воздуха, место установки и др.). Для выполнения этого требования прибор должен обладать достаточно большим коэффициентом теплопередачи – не менее  $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;

– экономические требования заключаются в малой стоимости и низкой металлоемкости прибора;

– санитарно-гигиенические требования ограничивают температуру поверхности прибора. Кроме этого, конструкция прибора должна обеспечивать доступность и удобство очистки от пыли поверхности нагрева. Ограничение температуры вызвано явлением разложения и сухой возгонки органической пыли на поверхности прибора, сопровождающимся выделением вредных веществ, в частности окиси углерода. Разложение пыли начинается при температуре  $65\text{--}70 \text{ °C}$  и интенсивно протекает на поверхности, имеющей температуру более  $80 \text{ °C}$ ;

– архитектурно-строительные требования определяют соответствие внешнего вида приборов интерьеру помещения и сокращение площади помещения, занимаемой приборами. Приборы должны быть компактными, т. е. глубина и длина приборов должны быть наименьшими при заданном тепловом потоке;

– производственно-монтажные требования заключаются в снижении трудовых затрат при изготовлении и монтаже приборов;

– эксплуатационные требования сводятся к управляемости теплоотдачи приборов и долговечности. Управляемость теплоотдачи зависит от тепловой инерции прибора. Приборы малой тепловой инерции имеют небольшую массу и вмещают мало воды. Такие приборы быстро изменяют теплоотдачу при регулировании параметров теплоносителя.

Разнообразие требований объясняет разнообразие конструкций отопительных приборов. Если прибор в наибольшей степени отвечает какой-либо группе требований, то уступает другому прибору в отношении прочих требований.

**Конвективные приборы** передают конвекцией не менее 75 % от общего теплового потока. К таким приборам относятся конвекторы и ребристые трубы.

*Конвектор* (рис. 3.1) состоит из трубчатого нагревателя и оребрения. Выпускают конвекторы с кожухом и без кожуха. Кожух декорирует нагреватель и способствует повышению теплопередачи благодаря увеличению подвижности воздуха у поверхности нагревателя.

Конвекторы соответствуют экономическим, производственно-монтажным и эксплуатационным требованиям, обладают пониженной температурой на поверхности, однако характеризуются низким коэффициентом теплопередачи и сложностью очистки от пыли.

*Ребристая труба* (рис. 3.2) представляет собой фланцевую чугунную трубу с тонкими ребрами на наружной поверхности. Выпускают ребристые трубы длиной 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м.

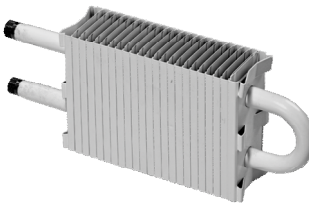


Рис. 3.1. Конвектор без кожуха



Рис. 3.2. Чугунная ребристая труба

Достоинствами ребристых труб являются низкая стоимость, пониженная температура на поверхности, компактность и долговечность. Недостатками являются несоответствие теплотехническим

и производственно-монтажным требованиям, высокая металлоемкость, сложность очистки от пыли, непривлекательный внешний вид и большая тепловая инерция.

**Конвективно-радиационные отопительные приборы** передают конвекцией от 50 до 75 % общего теплового потока. К ним относятся радиаторы и гладкотрубные приборы.

*Чугунные секционные радиаторы* (рис. 3.3) в зависимости от количества водяных каналов в одной секции подразделяются на двух- и трехканальные. Радиаторы выпускаются малой и средней высоты (расстояние между центрами ниппельных отверстий соответственно 500 и 300 мм). Секции собираются с помощью ниппелей. В качестве межсекционного уплотнителя используются прокладки из теплостойкой резины.

Чугунные секционные радиаторы характеризуются высокими значениями коэффициента теплопередачи, компактностью, относительно невысокой стоимостью и долговечностью. К недостаткам следует отнести высокую металлоемкость, несоответствие санитарно-гигиеническим и производственно-монтажным требованиям, непривлекательный внешний вид и большую тепловую инерцию.

*Стальные панельные радиаторы* (рис. 3.4) представляют собой отопительные приборы регистрового типа с горизонтальными коллекторами вверху и внизу каждой панели, соединенными вертикальными каналами. Панели радиаторов изготавливаются из двух симметричных, штампованных зеркально листов из высококачественной холоднокатаной стали толщиной не менее 1,2 мм, сваренных по периметру сплошным (роликовым) швом, а между вертикальными каналами – точечной сваркой.

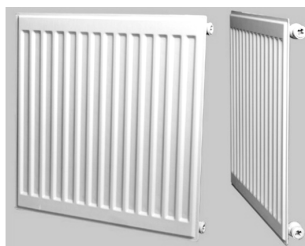


Рис. 3.3. Чугунный секционный радиатор    Рис. 3.4. Стальной панельный радиатор

Стальные панельные радиаторы соответствуют теплотехническим, экономическим и производственно-монтажным требованиям, вписываются в интерьер, легко очищаются от пыли и обладают малой тепловой инерцией, однако имеют высокую температуру на поверхности и малую стойкость против коррозии.

*Алюминиевые радиаторы* (рис. 3.5) являются воплощением современных технологий в отопительной технике. Различают проходные и концевые радиаторы. Проходной получают путем напрессовки литых алюминиевых секций на две стальные трубы с внутренней резьбой. Концевой радиатор присоединяется к проходному с помощью резьбовых ниппелей. Радиаторы окрашены порошковой краской, которая обеспечивает насыщенность и чистоту белого цвета.



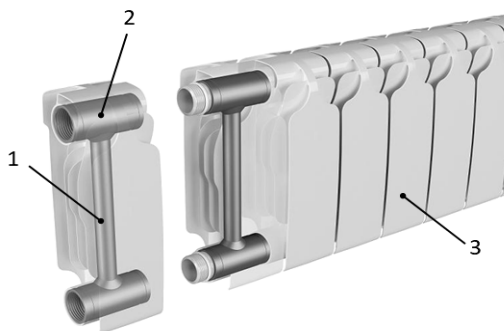
Рис. 3.5. Алюминиевый радиатор

Алюминиевые радиаторы соответствуют теплотехническим, экономическим, архитектурно-строительным, производственно-монтажным и эксплуатационным требованиям, однако не соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям и плохо выдерживают перепады давления.

На вершине развития радиаторов находится *биметаллический радиатор* (рис. 3.6). Коллекторы и вертикальный канал изготавливаются из нержавеющей стали и соединяются сваркой. К наружной поверхности стальных труб по специальной методике литья под давлением плотно присоединяется алюминиевый корпус.

Биметаллические радиаторы обладают всеми достоинствами алюминиевых радиаторов, но при этом способны выдерживать высокое давление в системе отопления. К недостаткам следует отнести значительную стоимость и несоответствие санитарно-гигиеническим требованиям.





*Рис. 3.6.* Биметаллический радиатор:  
1 – стальной канал; 2 – коллектор; 3 – алюминиевый корпус

*Гладкотрубные приборы* (рис. 3.7) изготавливают из толстостенных стальных труб, располагаемых одна над другой.



*Рис. 3.7.* Гладкотрубный прибор змеевиковой формы

Гладкотрубные приборы отличаются большими значениями коэффициента теплопередачи по сравнению с другими приборами, простотой очистки от пыли и долговечностью. Недостатками являются несоответствие экономическим, архитектурно-строительным, производственно-монтажным требованиям, высокая температура на поверхности и большая тепловая инерция.

При выборе отопительных приборов учитывают назначение и особенности теплового режима помещений, вид системы отопления, технико-экономические показатели прибора.

При повышенных санитарно-гигиенических и противопожарных требованиях выбирают приборы с гладкой поверхностью – панельные радиаторы и гладкотрубные приборы.

При обычных санитарно-гигиенических требованиях используют приборы с гладкой и ребристой поверхностью. В жилых зданиях рекомендуют конвекторы и радиаторы, в производственных – чугунные радиаторы, конвекторы и ребристые трубы.

Отопительные приборы должны обеспечивать равномерный обогрев помещений. Поэтому их целесообразно устанавливать под световыми проемами в местах, доступных для осмотра, очистки и ремонта. Длина прибора должна быть не менее половины ширины светового проема, а в ряде случаев (больница, школа и др.) – не менее трех четвертей ширины.

Отопительные приборы следует размещать по возможности ближе к полу, но на высоте не менее 60 мм от пола для удобства очистки подприборного пространства. При значительном подъеме над полом создается охлажденная зона, т. к. циркуляционные потоки нагреваемого воздуха, замыкаясь на уровне установки прибора, не захватывают и не прогревают в этом случае нижнюю часть помещения.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка (рис. 3.8) состоит из электроводонагревателя ЭВО-9, циркуляционного насоса WILLO Star RS25/4, расширительного бака Reflex N и отопительного прибора. Теплоносителем является горячая вода, которая циркулирует по замкнутому контуру. Для измерения температур теплоносителя предусмотрены биметаллические торцевые термометры ТБП-100. Измерение расхода теплоносителя осуществляется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВГ-15.

Отопительный прибор представляет собой радиатор, состоящий из десяти литых алюминиевых секций. Площадь поверхности нагрева одной секции – 0,4 м<sup>2</sup>.

Расширительный бак предназначен для компенсации температурных расширений воды в системе. В установке используется закрытый подвесной бак с упругой мембраной, разделяющей две среды – воду и инертный газ. Система находится под избыточным давлением, которое контролируется с помощью манометра. Для аварийного сброса воды при повышении давления выше номинального предусмотрен предохранительный клапан.

Удаление воздуха из системы осуществляется с помощью воздушного крана (крана Маевского).

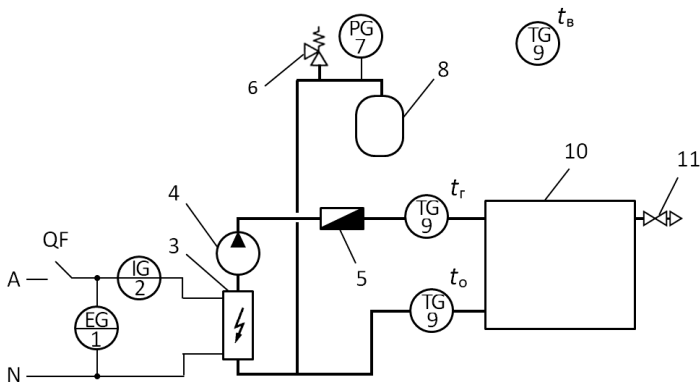


Рис. 3.8. Схема лабораторной установки:  
 1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – электроводонагреватель;  
 4 – циркуляционный насос; 5 – счетчик воды; 6 – предохранительный клапан;  
 7 – манометр; 8 – расширительный бак; 9 – термометр;  
 10 – отопительный прибор; 11 – воздушный кран

Для измерения мощности электроводонагревателя предусмотрены амперметр и вольтметр. Температура внутреннего воздуха  $t_b$  определяется по показаниям жидкостного термометра, находящегося в аудитории.

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений.

Таблица

Результаты измерений

Время, ч-мин	$U$ , В	$I$ , А	Температура, °С			$V_{сч}$ , М <sup>3</sup>
			$t_r$	$t_o$	$t_b$	

3. Через каждые 5 мин записывать показания измерительных приборов. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

## Обработка результатов измерений

Определить массовый расход теплоносителя  $G$ , кг/с, проходящего через отопительный прибор:

$$G = \frac{\rho DV_{\text{сч}}}{t}, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{\text{сч}}$  – разность показаний счетчика, м<sup>3</sup>, за время измерения  $t$ , с.

Рассчитать тепловой поток прибора  $\Phi$ , Вт:

$$F = c_p G(t_r - t_o), \quad (3.2)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·°C), для воды принять  $c_p = 4,2$  кДж/(кг·°C);

$t_r$  и  $t_o$  – значения температуры горячей и обратной воды, °C.

Сравнить полученное значение теплового потока  $\Phi$  с определенным по показаниям амперметра и вольтметра  $\Phi'$ , кВт:

$$F \neq UI \times 10^{-3}.$$

Найти среднюю температуру теплоносителя в приборе  $t_{\text{ср}}$  как среднее арифметическое значение температур  $t_r$  и  $t_o$ .

Рассчитать температурный напор прибора  $\Delta t$ , °C:

$$\Delta t = t_{\text{ср}} - t_b.$$

Определить коэффициент теплопередачи отопительного прибора  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C):

$$k = \frac{F \times 10^3}{F \Delta t}, \quad (3.3)$$

где  $F$  – площадь поверхности нагрева прибора, м<sup>2</sup>.

Сделать вывод о соответствии отопительного прибора теплотехническим требованиям.

## Контрольные вопросы

1. Каково назначение расширительного бака в составе лабораторной установки?
2. Каково назначение предохранительного клапана?
3. Каково назначение крана Маевского в составе лабораторной установки?
4. Для чего предназначены отопительные приборы?
5. Какие требования предъявляются к отопительным приборам?
6. Какие отопительные приборы относятся к конвективно-радиационным?
7. Какие отопительные приборы относятся к конвективным?
8. Каковы особенности конструкций отопительных приборов?
9. Каковы достоинства и недостатки отопительных приборов?
10. Как осуществляется выбор отопительных приборов?
11. Каковы правила размещения отопительных приборов?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

**Цель работы:** изучить факторы, влияющие на тепловой поток и коэффициент теплопередачи отопительного прибора; определить коэффициент теплопередачи алюминиевого радиатора при различных расходах теплоносителя.

**Материальное обеспечение:** лабораторная установка по исследованию отопительного прибора.

#### Основные сведения

Тепловой поток отопительного прибора  $\Phi$ , Вт:

$$\Phi = kF\Delta t, \quad (4.1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$F$  – площадь поверхности нагрева прибора, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – температурный напор, °С.

Для увеличения теплового потока необходимо развить внешнюю поверхность отопительного прибора. В приборах это выполняют созданием специальных выступов, приливов и оребрения, однако при этом уменьшается коэффициент теплопередачи.

Под температурным напором понимается разность между средней температурой теплоносителя в приборе  $t_{cp}$  и температурой воздуха в помещении  $t_B$ , °С:

$$\Delta t = t_{cp} - t_B. \quad (4.2)$$

Среднюю температуру теплоносителя вычисляют как среднее арифметическое значение температур воды на входе и выходе из прибора, хотя в действительности температура  $t_{cp}$  ниже средней арифметической.

Коэффициент теплопередачи отопительного прибора зависит от основных и второстепенных факторов.

К *основным факторам* относятся:

- вид и конструктивные особенности прибора;
- температурный напор прибора.

Вид отопительного прибора позволяет заранее судить о возможной величине коэффициента теплопередачи. Для гладкотрубных приборов характерны сравнительно высокие, для радиаторов – средние, для конвекторов и ребристых труб – низкие значения коэффициента теплопередачи.

Рост температурного напора прибора приводит к увеличению коэффициента теплопередачи.

*Второстепенными факторами* являются:

- расход теплоносителя;
- способ подводки теплоносителя к прибору;
- скорость движения воздуха у поверхности прибора;
- конструкция ограждения прибора;
- атмосферное давление;
- окраска приборов;
- наличие загрязнений и воздуха в приборе.

В зависимости от расхода теплоносителя изменяются скорость движения и режим течения воды в приборе, т. е. условия теплообмена на его внутренней поверхности. Кроме того, изменяется равномерность температурного поля на внешней поверхности прибора.

Наиболее равномерной и высокой температура поверхности радиаторов получается при подводке теплоносителя сверху вниз. Поэтому значение коэффициента теплопередачи будет в этом случае всегда выше, чем при движении теплоносителя снизу вниз и особенно снизу вверх.

Коэффициент теплопередачи уменьшается при переносе свободно установленного прибора в нишу стены. Декоративное ограждение прибора, выполненное без учета теплотехнических требований, может значительно уменьшить теплоотдачу.

При пониженном атмосферном давлении коэффициент теплопередачи понижается вследствие уменьшения плотности воздуха.

Состав и цвет краски могут несколько изменять коэффициент теплопередачи. Краски, обладающие высокой излучательной способностью, увеличивают теплоотдачу прибора, и наоборот. Например,

окраска цинковыми белилами повышает теплопередачу чугунного секционного радиатора на 2,2 %, а нанесение алюминиевой краски, растворенной в нитролаке, уменьшает ее на 8,5 %. Окраска конвекторов и ребристых труб незначительно влияет на их теплопередачу.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 4.1) состоит из электроводонагревателя ЭВО-9, циркуляционного насоса WILO Star RS25/4, расширительного бака Reflex N и отопительного прибора.

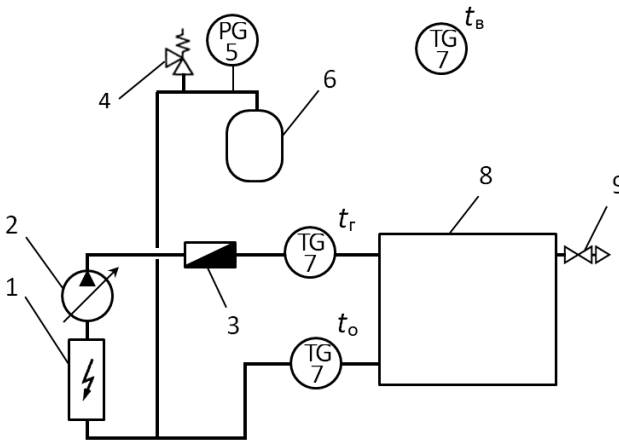


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки:

- 1 – электроводонагреватель; 2 – циркуляционный насос; 3 – счетчик воды;
- 4 – предохранительный клапан; 5 – манометр; 6 – расширительный бак;
- 7 – термометр; 8 – отопительный прибор; 9 – воздушный кран

Насос имеет предварительно задаваемые ступени частоты вращения для регулирования расхода теплоносителя. Переключение на другую ступень осуществляется с помощью поворотного переключателя на клеммной коробке насоса. Маркировка маленького размера обозначает самую низкую ступень частоты вращения, а маркировка большого размера – самую высокую ступень.

Теплоносителем является горячая вода, которая циркулирует по замкнутому контуру. Для измерения температуры теплоносителя



предусмотрены биметаллические торцевые термометры ТБП-100. Измерение расхода теплоносителя осуществляется счетчиком «Струмень-ГРАН» СВГ-15.

Расширительный бак предназначен для компенсации температурных расширений воды в системе. В установке используется закрытый подвесной бак с упругой мембраной, разделяющей две среды – воду и инертный газ. Система находится под избыточным давлением, которое контролируется с помощью манометра. Для аварийного сброса воды при значении давления выше номинального предусмотрен предохранительный клапан.

Отопительный прибор представляет собой радиатор, состоящий из десяти литых алюминиевых секций. Площадь поверхности одной секции – 0,4 м<sup>2</sup>.

Удаление воздуха из системы осуществляется с помощью воздушного крана (крана Маевского). Температура внутреннего воздуха  $t_v$  определяется по показаниям жидкостного термометра, находящегося в аудитории.

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Установить на насосе переключатель частоты вращения в положение «min».
3. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений.

Таблица

Результаты измерений

Время, ч-мин	Температура, °С			$V_{сч}, м^3$	Примечание
	$t_r$	$t_o$	$t_v$		

В графе «Примечание» указать положение переключателя частоты вращения.

4. Через каждые 5 мин записывать показания измерительных приборов. После наступления стационарного теплового режима установить на насосе переключатель частоты вращения в положение «max». Повторить измерения. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

## Обработка результатов измерений

Обработку результатов измерений выполнить отдельно для каждого положения переключателя частоты вращения насоса.

Определить массовый расход теплоносителя  $G$ , кг/с, проходящего через отопительный прибор:

$$G = \frac{\rho \Delta V_{\text{сч}}}{t}, \quad (4.3)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{\text{сч}}$  – разность показаний счетчика, м<sup>3</sup>, за время измерения  $t$ , с.

Рассчитать тепловой поток прибора  $F$ , Вт:

$$F = c_p G (t_{\text{г}} - t_{\text{о}}), \quad (4.4)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя кДж/(кг·°С), для воды принять  $c_p = 4,2$  кДж/(кг·°С);

$t_{\text{г}}$  и  $t_{\text{о}}$  – температуры горячей и обратной воды, °С.

Найти среднюю температуру воды в приборе  $t_{\text{ср}}$ .

Рассчитать температурный напор прибора по формуле (4.2).

Определить коэффициент теплопередачи отопительного прибора  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$k = \frac{F \cdot 10^3}{F D t}, \quad (4.5)$$

где  $F$  – площадь поверхности нагрева прибора, м<sup>2</sup>.

Сравнить полученные результаты расчетов.

## Контрольные вопросы

1. Каково назначение предохранительного клапана в составе лабораторной установки?
2. Каково назначение расширительного бака?
3. Каково назначение счетчика воды в составе лабораторной установки?

4. Каково назначение крана Маевского?
5. От каких факторов зависит тепловой поток отопительного прибора?
6. Что такое температурный напор прибора?
7. Как определить среднюю температуру воды в отопительном приборе?
8. Какие основные факторы влияют на коэффициент теплопередачи прибора?
9. Как влияет вид отопительного прибора на коэффициент теплопередачи?
10. Как влияет температурный напор прибора на коэффициент теплопередачи?
11. Какие второстепенные факторы влияют на коэффициент теплопередачи прибора?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** изучить назначение и устройство хладоновой холодильной установки; определить холодильный коэффициент и эффективную мощность на привод компрессора холодильной установки.

**Материальное обеспечение:** лабораторная установка по исследованию холодильной установки.

#### Основные сведения

В холодильной машине осуществляется охлаждение тел ниже температуры окружающей среды. Рабочее вещество холодильной машины, посредством которого осуществляется отвод теплоты от охлаждаемого объекта и передача ее в окружающую среду, называется *холодильным агентом (хладагентом)*. В холодильных машинах в качестве холодильного агента применяются аммиак и хладоны.

*Холодильная установка* представляет собой комплекс холодильных машин и дополнительного оборудования, предназначенный для производства и использования искусственного холода. В сельском хозяйстве нашли широкое применение пароконденционные холодильные установки. Принципиальная схема хладоновой холодильной установки приведена на рис. 5.1.

Циркуляция хладона осуществляется за счет работы поршневого компрессора. Привод компрессора от электродвигателя выполняется с помощью клиноременной передачи. В компрессоре пар хладона сжимается, при этом увеличиваются температура и давление хладагента.

Хладон с повышенной температурой поступает в конденсатор. Теплота отводится от пара в окружающую среду, и он конденсируется. Для увеличения интенсивности теплопередачи в конденсаторе предусмотрено принудительное движение воздуха при помощи осевого вентилятора.

Жидкий хладон стекает в ресивер. Ресивер предназначен для хранения запаса хладагента и обеспечения им холодильной установки при переменных тепловых нагрузках.

Фильтр-осушитель предусмотрен для очистки хладона от механических примесей и удаления влаги. В качестве фильтрующего материала используется два слоя латунной сетки, между которыми

находится фильтрующая ткань. Осушитель заполнен сорбентом, т. е. веществом, которое хорошо поглощает воду. В качестве сорбента применяется силикагель (окись кремния).

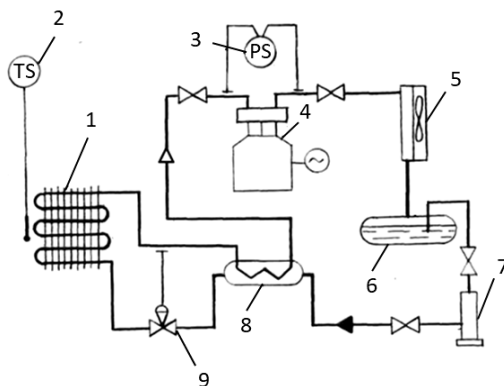


Рис. 5.1. Принципиальная схема хладоновой холодильной установки:

- 1 – испаритель; 2 – реле температуры; 3 – реле давления;
- 4 – компрессор; 5 – конденсатор; 6 – ресивер; 7 – фильтр-осушитель;
- 8 – теплообменник; 9 – терморегулирующий вентиль

Наличие механических примесей приводит к нарушению нормальной работы холодильной установки. Основными причинами загрязнений являются плохая очистка внутренних поверхностей оборудования при производстве, недостаточно тщательная их промывка после монтажа и ремонта установки, заливка загрязненного масла.

Вода, попадая в хладон, замерзает в терморегулирующем вентиле (ТРВ) и образует ледяные пробки, что может привести к остановке холодильной установки. Источником влаги является влажный воздух, который остается в системе при недостаточно тщательном его удалении после монтажа.

После фильтра-осушителя хладагент поступает в теплообменник, где происходит теплообмен между жидким хладоном и его паром, выходящим из испарителя. Этот процесс позволяет осуществить регенерацию теплоты. В результате теплообмена жидкий хладон переохлаждается, а пар холодильного агента досушивается и перегревается. Перегрев пара предохраняет компрессор от попадания жидкого хладагента и аварии в результате гидравлического удара.

В ТРВ происходит дросселирование хладагента, которое сопровождается резким понижением его температуры и давления. Далее низко-

температурный хладагент поступает в испаритель, где происходит его кипение за счет теплоты, отнимаемой от объекта охлаждения.

При переменных тепловых нагрузках (загрузка и выгрузка продуктов, открывание дверей холодильной камеры) приток теплоты к испарителю и интенсивность кипения хладона изменяются. Возможно или переполнение испарителя жидким хладагентом, или установление его уровня в испарителе ниже допустимого, что может привести к нарушению нормальной работы компрессора и холодильной установки в целом.

ТРВ предназначен для автоматического регулирования подачи жидкого хладона и поддержания постоянного его уровня в испарителе. Конструкция ТРВ приведена на рис. 5.2.

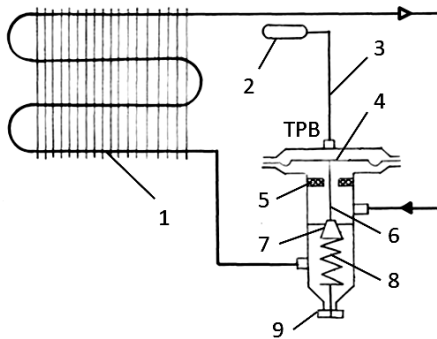


Рис. 5.2. Конструкция ТРВ:

- 1 – испаритель; 2 – баллон с легкокипящей жидкостью;
- 3 – импульсная линия; 4 – мембрана; 5 – уплотнение штока;
- 6 – шток; 7 – клапан; 8 – пружина; 9 – регулировочный винт

В схеме регулирования использована зависимость интенсивности кипения жидкости и давления образующихся паров от температуры пара хладона на выходе из испарителя. Давление образующихся в баллоне паров действует на мембрану и вызывает перемещение клапана. Повышение температуры хладона на выходе из испарителя приводит к большему открытию клапана, а снижение – к его закрытию.

Реле температуры автоматически поддерживает в холодильной камере заданную температуру. Контакты реле включены в цепь управления электродвигателя компрессора. Предусмотрено двухпозиционное регулирование: при значении температуры выше

заданной реле включает компрессор, а при достижении заданной температуры – отключает.

Реле давления служит для защиты компрессора от повышения давления в линии нагнетания и снижения давления в линии всасывания по сравнению с номинальными значениями. При возникновении аварийных режимов реле давления отключает компрессор.

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (см. рис. 5.1). Хлад-агентом является хладон R12.

2. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений.

Таблица

Результаты измерений

Время, ч-мин	Температура, °С	
	$t_1$	$t_2$

3. По указанию преподавателя измерить температуру хладагента на входе в компрессор  $t_1$  и после сжатия  $t_2$ . Для этой цели предназначен переносной термогигрометр «testo 635», при использовании которого необходимо подключить к прибору температурный зонд и включить прибор нажатием на клавишу «I/O». После короткого самотестирования термогигрометр готов к работе.

Считывание показаний осуществляется после нажатия на клавишу «T1/T2/td» (на экране напротив измеряемой величины высвечивается стрелка).

Высвечивание на экране записи «Bat» свидетельствует об окончании ресурса элементов питания.

4. Через каждые 5 мин записывать показания прибора. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

### Обработка результатов измерений

Теплофизические свойства хладона R12 в состоянии насыщения приведены в прилож. 1.

Определить удельную работу  $l$ , кДж/кг, затраченную при адиабатном сжатии пара хладона в компрессоре:

$$l = h_2 - h_1, \quad (5.1)$$

где  $h_2$  и  $h_1$  – удельные энтальпии сухого насыщенного пара хладона R12 при температуре соответственно  $t_2$  и  $t_1$ , кДж/кг.

Рассчитать холодильный коэффициент  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{h_1 - h_3}{l}, \quad (5.2)$$

где  $h_3$  – удельная энтальпия кипящего хладона R12 при температуре  $t_2$ , кДж/кг.

Рассчитать теоретическую мощность на привод компрессора  $N$ , кВт:

$$N = \frac{\Phi}{\epsilon}, \quad (5.3)$$

где  $\Phi$  – холодопроизводительность установки (принять  $\Phi = 0,82$  кВт).

Определить мощность на валу электродвигателя компрессора  $N_e$ , кВт:

$$N_e = \frac{N}{\eta_m \eta_{ад}}, \quad (5.4)$$

где  $\eta_m$  – механический КПД компрессора (принять  $\eta_m = 0,85$ );  
 $\eta_{ад}$  – адиабатный КПД компрессора (принять  $\eta_{ад} = 0,81$ ).

### Контрольные вопросы

1. Что такое холодильный агент?
2. Какие существуют хладагенты холодильных машин?
3. Что такое холодильная установка?
4. Как изменяются термодинамические параметры хладагента в компрессоре?



5. Для чего предназначен фильтр-осушитель?
6. Как изменяются термодинамические параметры хладагента в ТРВ?
7. Каково назначение теплообменника в составе холодильной установки?
8. Для чего предназначен ресивер?
9. Что происходит с хладагентом в испарителе?
10. Каков принцип действия реле температуры?
11. Для чего предназначено реле температуры?
12. Каков принцип действия ТРВ?

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

**Цель работы:** изучить процессы изменения тепловлажностного состояния влажного воздуха при сушке материалов; определить основные параметры влажного воздуха в расчетных сечениях.

**Материальное обеспечение:** лабораторная установка по исследованию конвективной сушки.

#### Основные сведения

Сушка представляет собой процесс удаления влаги из материала.

Наибольшее распространение получил конвективный способ сушки, при котором теплота передается материалу конвекцией от агента сушки. Агент сушки является одновременно теплоносителем и влагопоглотителем. В качестве агента сушки применяется нагретый воздух или смесь его с топочными газами.

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Основными параметрами, характеризующими состояние влажного воздуха, являются температура, относительная влажность, влагосодержание и энтальпия.

Отношение парциального давления водяного пара  $p_n$  во влажном воздухе к давлению насыщения пара  $p_s$  при температуре воздуха называется относительной влажностью  $\varphi$ , %:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_s} 100. \quad (6.1)$$

Относительная влажность характеризует способность воздуха насыщаться влагой: чем ниже значение  $\varphi$ , тем выше влагопоглотительная способность воздуха. С повышением температуры воздуха увеличивается давление насыщения пара и соответственно уменьшается относительная влажность.

В практических расчетах для оценки содержания водяного пара в воздухе используют *влагосодержание* – отношение массы водяного пара  $m_n$  во влажном воздухе к массе сухого воздуха  $m_c$ , г/кг:

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с}}}.$$

В процессе сушки масса водяного пара увеличивается на величину испаренной из материала влаги, а масса сухого воздуха остается неизменной.

*Энтальпия (теплосодержание)* является тепловой функцией состояния воздуха. Она численно равна количеству теплоты, необходимому для нагрева 1 кг воздуха от 0 °С до температуры  $t$  при постоянном давлении. Энтальпию относят к 1 кг сухого воздуха и определяют по формуле, кДж/кг:

$$h = 1,01t + (2500 + 1,88t) \frac{d}{1000}. \quad (6.2)$$

Изменение энтальпии представляет собой количество теплоты, подведенное к воздуху или отведенное от него в изобарном процессе.

Изменение состояния воздуха в процессе сушки можно разделить на два процесса:

- нагрев воздуха в калорифере;
- увлажнение воздуха в сушильной камере.

При повышении температуры воздуха увеличивается его энтальпия и возрастает давление насыщения пара, что приводит к уменьшению относительной влажности. Процесс нагрева воздуха проходит при постоянном влагосодержании, т. к. влага извне не поступает и масса водяного пара не изменяется.

В сушильной камере агент сушки затрачивает теплоту на нагрев материала, испарение из него влаги и теплопотери в окружающую среду. Процесс сушки материала сопровождается уменьшением температуры и энтальпии воздуха. В результате испарения влаги из материала увеличиваются относительная влажность и влагосодержание.

Расчет процессов изменения состояния воздуха удобно производить с помощью диаграммы влажного воздуха (прилож. 3). Любая точка на диаграмме определяет тепловлажностное состояние воздуха. Процесс изменения состояния воздуха на диаграмме изображается линией.

Состояние воздуха перед калорифером определяется точкой  $I$  (рис. 6.1), полученной на пересечении изотермы  $t_1$  и линии постоянной относительной влажности  $\phi_1$ .

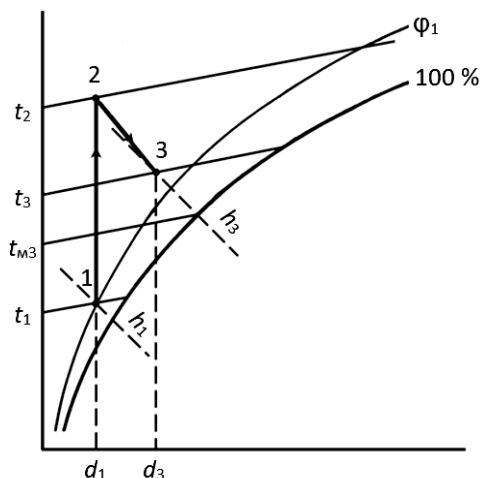


Рис. 6.1. Процессы изменения состояния влажного воздуха на диаграмме

Нагрев воздуха до температуры  $t_2$  протекает при постоянном влагосодержании и изображается на диаграмме влажного воздуха линией 1–2.

Увлажнение воздуха происходит по линии 2–3. Точка 3 определяет состояние влажного воздуха на выходе из сушильной камеры и строится на пересечении изотерм «сухого»  $t_3$  и «мокрого»  $t_{M3}$  термометров.

### Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки (рис. 6.2) входят радиальный вентилятор, калорифер и сушильная камера. Расход воздуха измеряется по перепаду давления на диафрагме, а также с помощью ротационного газового счетчика. Диаметр отверстия диафрагмы составляет 65,5 мм. Для регулирования расхода воздуха предусмотрен шибер.

Калорифер имеет два электронагревателя, которые соединены параллельно и могут включаться как по отдельности, так и вместе. Для измерения мощности калорифера предусмотрены амперметр и вольтметр.

В качестве высушиваемого материала используется мелко нарезанный поролон. Для его увлажнения предусмотрен водяной лоток, установленный сверху сушильной камеры.

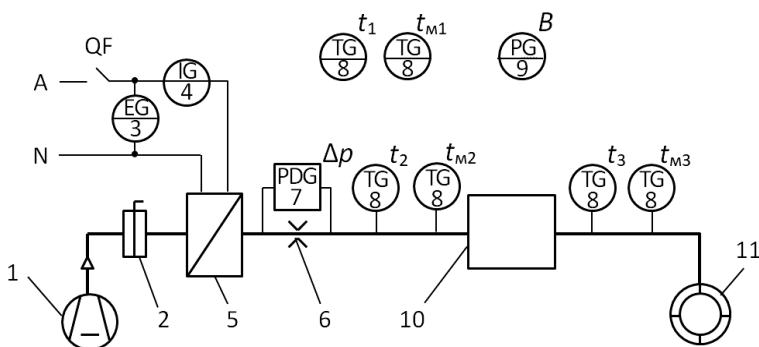


Рис. 6.2. Схема лабораторной установки:

- 1 – радиальный вентилятор; 2 – шибер; 3 – вольтметр; 4 – амперметр;  
 5 – калорифер; 6 – диафрагма; 7 – микроманометр; 8 – термометр;  
 9 – барометр; 10 – сушильная камера; 11 – газовый счетчик

Измерение параметров воздуха предусмотрено в трех сечениях:

- 1) перед калорифером;
- 2) перед сушильной камерой;
- 3) после сушильной камеры.

Для измерения атмосферного давления предусмотрен барометр. В сечениях 2 и 3 установлены психрометры с капельницами для увлажнения «мокрых» термометров.

### Методика выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Подготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерений (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Результаты измерений

Время, ч-мин	U, В	I, А	Температура, °С						Δp, Па	V <sub>сч</sub> , м <sup>3</sup>	B, кПа
			t <sub>1</sub>	t <sub>м1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>м2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>м3</sub>			

Для измерения перепада давления на диафрагме предусмотрен микроманометр ММН-2400 с наклонной трубкой, при использовании которого необходимо:

- отрегулировать ножками прибора его расположение в горизонтальной плоскости, добиваясь положения пузырька в центре каждого уровня;
- повернуть пробку трехходового крана против часовой стрелки до упора и установить регулятором положения мениска уровень жидкости в стеклянной трубке на нуль;
- повернуть пробку трехходового крана по часовой стрелке до упора;
- произвести отсчет по шкале;
- определить истинное значение измеряемого перепада давления, Па:

$$D_p = 9,8KH, \quad (6.3)$$

где  $K$  – постоянная прибора, при которой произведено измерение (зависит от угла наклона стеклянной трубки и указывается на дуге прибора);

$H$  – отсчет по шкале, мм.

3. Через каждые 5 мин записывать показания измерительных приборов. После наступления стационарного теплового режима показать результаты измерений преподавателю и приступить к обработке данных.

### **Обработка результатов измерений**

В трех рассматриваемых сечениях определить основные параметры влажного воздуха. При расчетах учесть, что температуру воздуха определяют по показаниям «сухих» термометров.

*Первое сечение:*

- 1) относительную влажность воздуха  $\phi$  определить по таблице психрометра;
- 2) в зависимости от температуры воздуха  $t$  по прилож. 2 определить давление насыщения пара  $p_s$ ;
- 3) найти из уравнения (6.1) парциальное давление водяного пара  $p_n$ ;
- 4) рассчитать влагосодержание воздуха, г/кг:

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}}, \quad (6.4)$$

где  $B$  – барометрическое (атмосферное) давление, кПа;

5) определить энтальпию воздуха  $h$  по уравнению (6.2).

*Второе сечение:*

1) принять одинаковыми значения парциального давления пара и влагосодержания воздуха во втором и первом сечениях;

2) в зависимости от температуры воздуха  $t$  по прилож. 2 определить давление насыщения пара  $p_s$ ;

3) определить относительную влажность  $\varphi$  и энтальпию  $h$  воздуха по уравнениям (6.1) и (6.2) соответственно.

*Третье сечение:*

1) определить относительную влажность воздуха  $\varphi$ , %:

$$j = \frac{p_{sM} - 6,8 \times 10^{-4} B(t_3 - t_{M3})}{p_s} 100, \quad (6.5)$$

где  $p_{sM}$  и  $p_s$  – значения давления насыщения водяного пара при температуре  $t_{M3}$  и  $t_3$  соответственно (см. прилож. 2), кПа.

2) найти из уравнения (6.1) значение  $p_{\text{п}}$ ;

3) рассчитать влагосодержание  $d$  и энтальпию  $h$  воздуха соответственно по уравнениям (6.4) и (6.2).

Полученные данные записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчетов

Номер сечения	$t$ , °C	$t_m$ , °C	$\varphi$ , %	$d$ , г/кг	$h$ , кДж/кг

Занести в табл. 6.2 параметры, определенные по диаграмме влажного воздуха (прилож. 3), и сравнить с ранее рассчитанными. В дальнейшем использовать параметры воздуха, полученные в результате расчета.

Рассчитать плотность воздуха перед диафрагмой  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{B}{RT}, \quad (6.6)$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная, принять равной 0,287 кДж/(кг·К);  
 $T$  – термодинамическая температура воздуха, К (принять  $T = t_2 + 273$ ).

Массовый расход воздуха  $G$ , кг/с, определить по уравнению

$$G = \alpha \varepsilon S_0 \sqrt{2 \rho \Delta p}, \quad (6.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода, принять равным 0,61;

$\varepsilon$  – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (принять  $\varepsilon = 0,98$ );

$S_0$  – площадь отверстия диафрагмы, м<sup>2</sup>.

Определить массу воздуха  $m_{\text{в}}$ , кг, по расчетному расходу:

$$m_{\text{в}} = Gt, \quad (6.8)$$

где  $t$  – время измерений, с.

Найти массу воздуха по показаниям газового счетчика, кг:

$$m_{\text{в}} = \rho' \Delta V_{\text{сч}}, \quad (6.9)$$

где  $\rho'$  – плотность воздуха перед газовым счетчиком, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{\text{сч}}$  – разность показаний газового счетчика за время измерений  $t$ , м<sup>3</sup>.

Значение  $\rho'$  определить по уравнению (6.6) при температуре  $T = t_3 + 273$ .

Рассчитать массу воздуха, прошедшего через сушильную камеру,  $m_{\text{в}}$ , кг:

$$m_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}^{\text{сч}} + m_{\text{в}}^{\text{в}}}{2}.$$

Определить массу испаренной из материала влаги  $m_{\text{в}}$ , кг:

$$m_{\text{в}} = 0,001(d_3 - d_2)m_{\text{в}}.$$



Рассчитать расход воздуха на испарение 1 кг влаги (удельный расход воздуха)  $l$ , кг/кг:

$$l = \frac{1000}{d_3 - d_2}.$$

Найти расход теплоты на испарение 1 кг влаги (удельный расход теплоты)  $q$ , кДж/кг:

$$q = l(h_2 - h_1).$$

Рассчитать удельный расход теплоты  $q'$ , кДж/кг:

$$q\phi = \frac{Pt}{m_w}, \quad (6.10)$$

где  $P$  – электрическая мощность калорифера, кВт.

Сравнить полученные значения  $q$  и  $q'$ .

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение шибера в составе лабораторной установки?
2. Что называется сушкой?
3. Каковы функции агента сушки?
4. Что используют в качестве агента сушки?
5. Что представляет собой влажный воздух?
6. Какие основные параметры характеризуют состояние влажного воздуха?
7. Что такое относительная влажность воздуха?
8. Что называется влагосодержанием воздуха?
9. Что представляет собой энтальпия воздуха?
10. Как изменяются параметры воздуха после его нагрева?
11. Как изменяется тепловлажностное состояние воздуха после сушильной камеры?
12. Как процессы изменения состояния влажного воздуха отражены на диаграмме влажного воздуха?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амерханов, Р. А. Теплотехника : учебник / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 433 с.
2. Оболенский, Н. В. Холодильное и вентиляционное оборудование / Н. В. Оболенский, Е. А. Денисюк. – М. : КолосС, 2006. – 248 с.
3. Свистунов, В. М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов АПК и жилищно-коммунального хозяйства : учебник для вузов / В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков. – 2-е изд. – СПб. : Политехника, 2007. – 423 с.
4. Теплотехнологии : пособие / сост.: В. А. Коротинский, А. Г. Цубанов, И. А. Цубанов. – Минск : БГАТУ, 2013. – 400 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Теплофизические свойства хладона R12 в состоянии насыщения

$t$ , °C	$p$ , МПа	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
-20	0,151	1459	0,1090	381,4	543,0	161,6	3,930	4,568
-18	0,163	1453	0,1020	383,2	543,9	160,7	3,937	4,567
-16	0,176	1447	0,0945	385,1	544,8	159,7	3,944	4,565
-14	0,189	1440	0,0881	386,9	545,7	158,8	3,951	4,564
-12	0,204	1434	0,0823	388,8	546,6	157,8	3,958	4,563
-10	0,220	1428	0,0769	390,6	547,5	156,9	3,965	4,562
-8	0,236	1422	0,0719	392,5	548,5	156,0	3,972	4,561
-6	0,253	1415	0,0674	394,4	549,4	155,0	3,979	4,560
-4	0,271	1409	0,0632	396,2	550,3	154,1	3,986	4,558
-2	0,289	1402	0,0593	398,1	551,2	153,1	3,993	4,558
0	0,309	1396	0,0557	400,0	552,1	152,1	4,000	4,557
2	0,330	1389	0,0523	401,9	553,0	151,1	4,007	4,556
4	0,352	1383	0,0492	403,8	553,8	150,0	4,021	4,554
6	0,375	1376	0,0464	405,7	554,7	149,0	4,021	4,554
8	0,398	1369	0,0437	407,6	555,6	148,0	4,027	4,554
10	0,424	1362	0,0412	409,5	556,4	146,9	4,034	4,553
12	0,450	1356	0,0389	411,5	557,3	145,8	4,041	4,552
14	0,477	1349	0,0367	413,4	558,2	144,8	4,047	4,552
16	0,506	1342	0,0347	415,3	559,0	143,7	4,054	4,551
18	0,536	1335	0,0328	417,3	559,9	142,6	4,061	4,550
20	0,567	1327	0,0311	419,2	560,7	141,5	4,067	4,550
22	0,599	1320	0,0294	421,2	561,5	140,3	4,074	4,549
24	0,633	1313	0,0279	423,1	562,3	139,2	4,080	4,549
26	0,669	1306	0,0264	425,1	563,1	138,0	4,087	4,548
28	0,705	1298	0,0250	427,1	563,9	136,8	4,093	4,548
30	0,744	1291	0,0238	429,1	564,7	135,6	4,010	4,547
32	0,783	1283	0,0226	431,1	565,5	134,4	4,106	4,547
34	0,824	1275	0,0214	433,1	566,3	133,2	4,113	4,546

Окончание приложения 1

$t$ , °C	$p$ , МПа	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
36	0,867	1268	0,0204	435,1	567,0	131,9	4,119	4,546
38	0,912	1260	0,0194	437,2	567,8	130,6	4,126	4,545
40	0,958	1252	0,0184	439,2	568,5	129,3	4,132	4,545
42	1,005	1244	0,0175	441,2	569,2	128,0	4,138	4,544
44	1,055	1235	0,0167	443,3	569,8	126,6	4,145	4,544
46	1,106	1227	0,0159	445,3	570,6	125,3	4,151	4,544
48	1,159	1219	0,0151	447,4	571,2	123,8	4,158	4,543
50	1,214	1210	0,0144	449,5	571,9	122,4	4,164	4,543

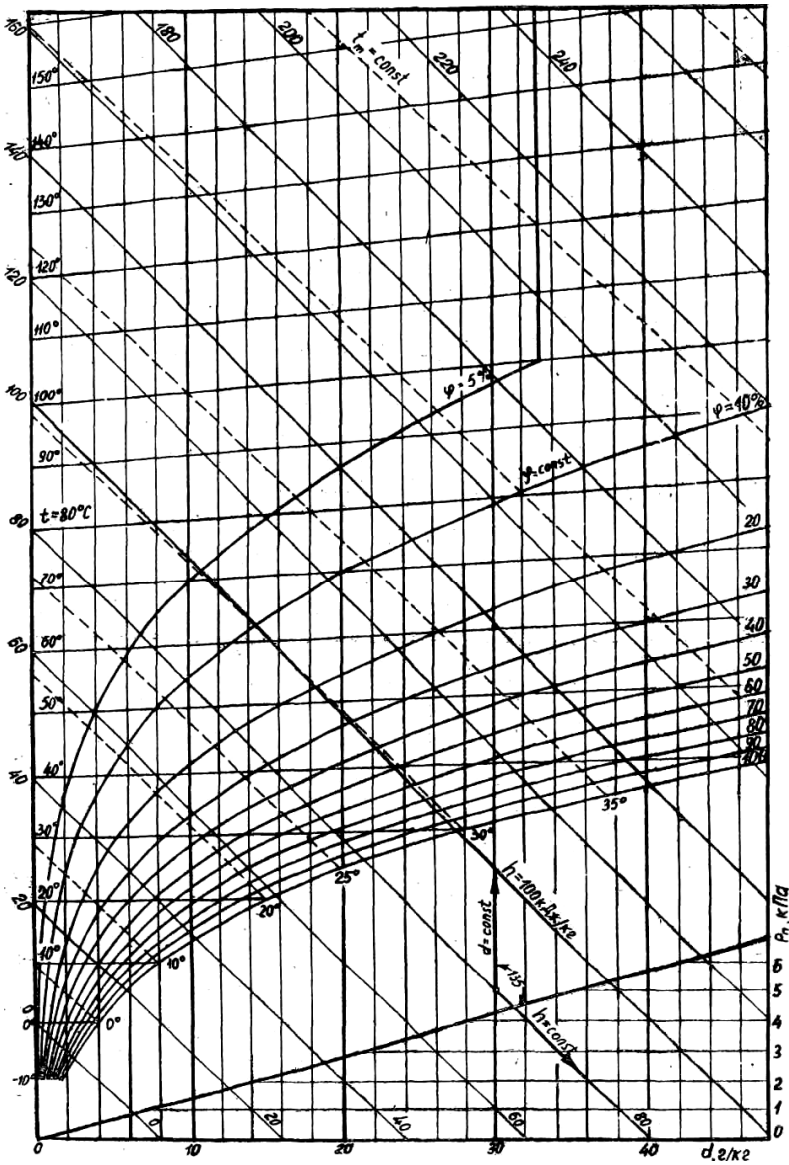
## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Давление насыщения водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{s}, \text{кПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{s}, \text{кПа}$
10	1,23	35	5,62
11	1,31	36	5,94
12	1,40	37	6,27
13	1,50	38	6,62
14	1,60	39	6,99
15	1,70	40	7,38
16	1,82	41	7,78
17	1,94	42	8,20
18	2,06	43	8,64
19	2,20	44	9,10
20	2,34	45	9,58
21	2,49	46	10,09
22	2,64	47	10,61
23	2,81	48	11,16
24	2,98	49	11,74
25	3,17	50	12,34
26	3,36	51	12,96
27	3,56	52	13,61
28	3,78	53	14,29
29	4,00	54	15,00
30	4,24	55	15,73
31	4,49	56	16,51
32	4,75	57	17,31
33	5,03	58	18,15
34	5,32	59	19,01

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Диаграмма влажного воздуха



Учебное издание

**Цубанов** Игорь Александрович,  
**Коротинский** Виктор Андреевич,  
**Цубанов** Александр Григорьевич

ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *В. А. Коротинский*  
Корректор *Д. А. Значёнок*  
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 11.11.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,55. Тираж 99 экз. Заказ 479.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.