**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Кафедра Теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции
Центр инженерных систем в строительстве «SYSTEMS/СИСТЕМЫ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Указания по выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»

Казань 2020

УДК 697.34
ББК 38.76

С12 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ. Указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство» / Сост.: Р.Г. Сафиуллин, Л.Э. Осипова, В.Н. Енюшин, Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2020.– 34 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторного практикума по дисциплинам «Отопление», «Теплогазоснабжение и вентиляция». Работы проводятся на экспериментальном стенде «Системы отопления и отопительные приборы», расположенном в Центре инженерных систем в строительстве "SYSTEMS"/"Системы". Стенд имеет блок подготовки теплоносителя, где смонтированы источник тепла, контрольно-измерительные приборы и управляющая трубопроводная аппаратура, а также испытательную камеру, в которой установлены отопительные приборы. Принудительная вентиляция камеры позволяет быстро отводить тепло от приборов при проведении испытаний.

Разработанные методики проведения комплекса лабораторных работ на стенде позволяют более полно понимать структуру и принцип работы системы отопления, дают возможность студентам применять свои знания и практические навыки для повышения эффективности работы отопительной системы.

Рецензент

к.т.н., доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» А.С. Селюгин

УДК 697.34
ББК 38.76

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2020
© Сафиуллин Р.Г., Осипова Л.Э., В Н. Енюшин, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Правила безопасности при проведении лабораторных работ в Центре инженерных систем в строительстве «Systems/Системы»…. 4

1. Общие сведения о лабораторном стенде ……. 5

2. Лабораторный практикум на стенде …… 7

Лабораторная работа №1. Определение эффективности радиаторов при различных режимах работы системы топления……. 7

Лабораторная работа №2. Определение линейного коэффициента теплопередачи трубопровода …… 16

Лабораторная работа №3. Определение кпд тепловой изоляции трубопровода …….. 20

Лабораторная работа №4. Определение гидравлического сопротивления приборов узлов ……. 22

Лабораторная работа №5. Определение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора …….. 28

Список использованных источников ……... 31

Приложения ……. 32

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ЦЕНТРЕ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ «SYSTEMS/СИСТЕМЫ»

Лаборатории Центра инженерных систем в строительстве «SYSTEMS/СИСТЕМЫ» относятся к помещениям повышенной опасности, поэтому при выполнении работ нужно соблюдать дисциплину, внимательность и осторожность.

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прослушавшие инструктаж по охране труда и технике безопасности, расписавшиеся в специальном журнале о его прохождении и обладающие необходимыми знаниями по предстоящей работе.

Лабораторная работа выполняется бригадой в составе не более трех - четырех человек в соответствии с установленным графиком.

В лабораториях запрещается:

- касаться проводников и неизолированных частей аппаратуры, находящихся под напряжением;
- касаться нагретых поверхностей лабораторной установки;
- изменять настройки контроллера лабораторной установки без разрешения преподавателя;
- оставлять без наблюдения включенную установку, находящуюся в ручном режиме работы;
- при работе с нагнетателями (насосами, компрессорами) в ручном режиме работы менять установленное давление;
- изменять регулировку приборов, закрывать или открывать краны установок без разрешения преподавателя;
- касаться вращающихся частей вентиляторов, компрессоров, насосов, электродвигателей;
- загромождать свое рабочее место одеждой, сумками, книгами и другими вещами, не относящимися к работе;
- проникать за установленные заграждения;
- работать одному в помещении лаборатории.

ЕСЛИ ПРОИЗОШЕЛ НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ:

1. Отключить электропитание лаборатории рубильником.
2. Вызвать по телефону «030» (Мегафон, МТС, Теле2), «003» (Билайн), «903» (Скай Линк), «103» «скорую помощь» или 112 - единая служба спасения, вызов с номера возможен даже при отсутствии денежных средств на вашем счету и заблокированной SIM-карте.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕНДЕ В ЦЕНТРЕ «SYSTEMS»

Лабораторный практикум проводится на стенде «Системы отопления и отопительные приборы» с микропроцессорной системой обработки данных (рис. 1).

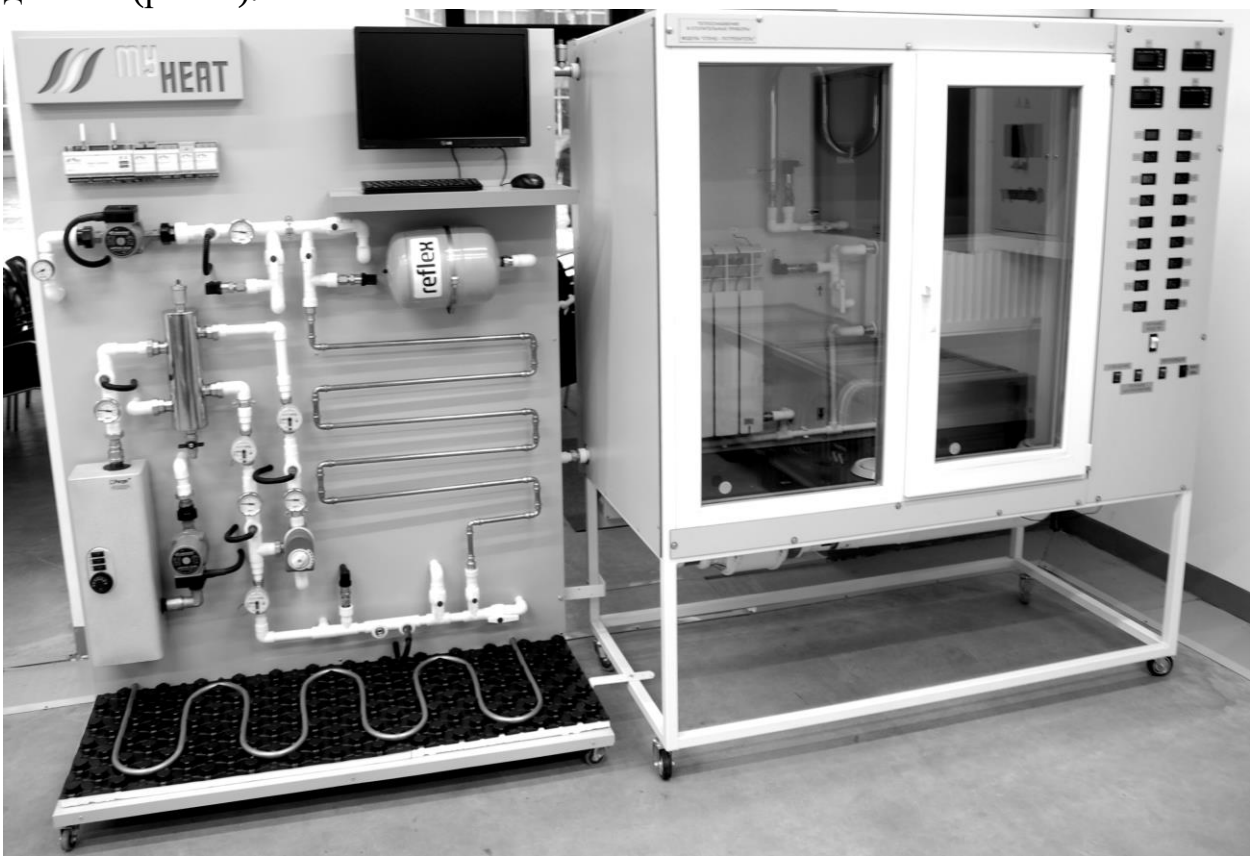

Рис. 1. Общий вид стенда в зале «Теплогенерация и микроклимат» Центра «SYSTEMS/СИСТЕМЫ»

Гидравлическая схема стенда из двух функциональных блоков А и Б приведена на рис. 2. Основным элементом блока А является электрический котел ЕКСО (поз. 1). Он предназначен для подготовки требуемых параметров теплоносителя при проведении экспериментов. Котел имеет три ступени электротэнов и ручной регулятор температуры воды (тепловой мощности). Циркуляция воды в «контуре котла» обеспечивается насосом 2 с тремя скоростями вращения ротора, циркуляция в «отопительном контуре» – насосом 3. Оба циркуляционных контура связаны между собой через «гидравлическую стрелку» 4.

Расход воды на подаче и в обратном трубопроводе фиксируется с помощью электромеханических счетчиков поз. 5÷8. Изменение температуры в отопительном контуре обеспечивает трехходовой смесительный клапан 9 с электроприводом, через который обратная вода подмешивается к греющему теплоносителю в необходимой пропорции.

Управляющие сигналы от датчиков (измерителей) температур, давлений и расходов сведены в контроллер 10, программно связанный с компьютером. На экране монитора компьютера отслеживаются параметры теплоносителя, изменяются режимы циркуляции теплоносителя через отопительный контур.

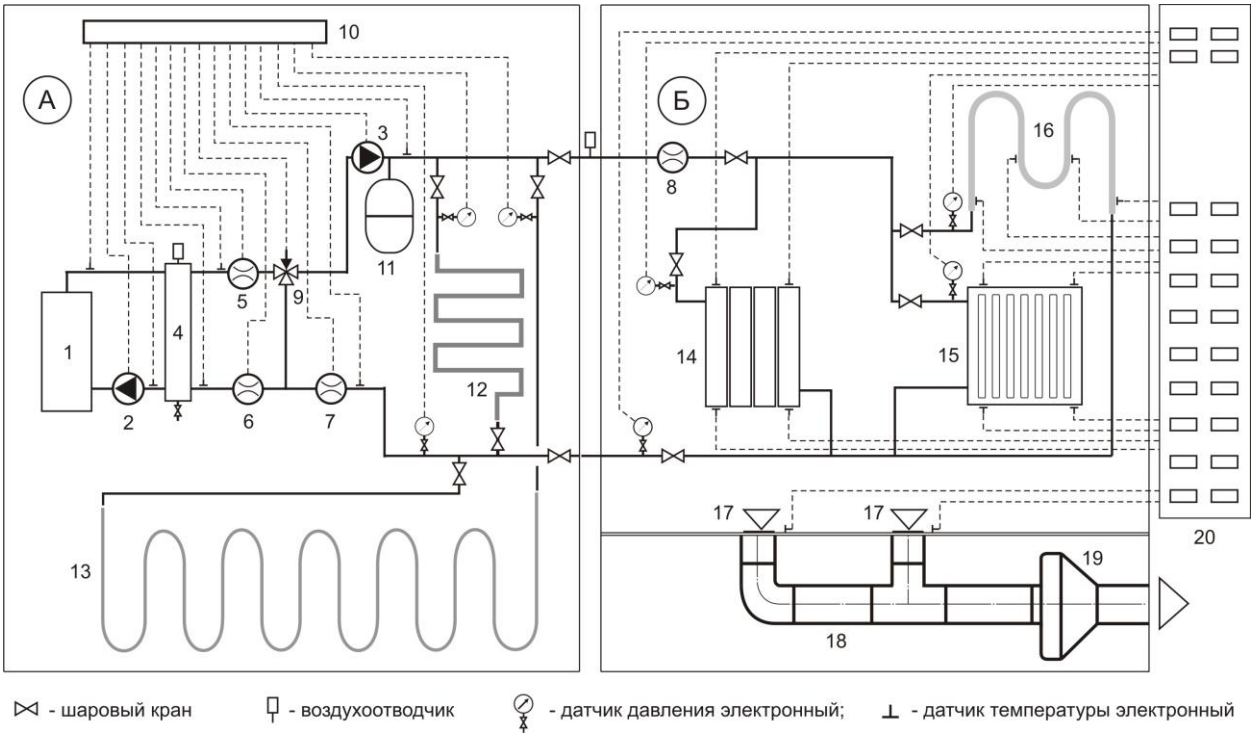

Рис. 2. Схема лабораторного стенда «Системы отопления и отопительные приборы»:
А - блок подготовки теплоносителя; Б - камера испытаний отопительных приборов.
1 - электрокотел; 2,3 - насосы; 4 - гидрострелка; 5,6,7,8 - расходомеры (электромеханический); 9 - трехходовой смесительный клапан с электроприводом; 10 - мембранный расширительный бак; 11 - контроллер; 12 - змеевик из медных труб; 13 - змеевик из металлопластиковых труб на теплоизолирующей основе конструкции “теплый пол”; 14 - алюминиевый секционный радиатор; 15 – стальной панельный радиатор; 16 - полотенцесушитель; 17 - вытяжной диффузор; 18 - пластиковый воздуховод; 19 – вытяжной канальный вентилятор; 20 – контрольно-измерительная панель.

В блоке А к отопительному контуру подсоединены дополнительно два малых циркуляционных контура из медных (поз. 11) и металлопластиковых (поз.12) труб, моделирующих устройство неизолированной теплотрассы и «теплого пола», соответственно. На медный трубопровод можно нанести тепловую изоляцию и провести исследование ее эффективности.

В блоке Б, представляющем собой герметичный бокс с системой прямоточной вентиляции 17÷19, установлены три отопительных прибора разной конструкции: алюминиевый секционный радиатор 14; стальной панельный радиатор 15 и полотенцесушитель 16 из никелированной

стальной трубы. Информация с датчиков давления и температуры на отопительных приборах, а также температуры воздуха в боксе направляется на контрольно-измерительную панель 20.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ НА СТЕНДЕ

Лабораторная работа № 1.

Определение эффективности радиаторов при различных режимах работы системы отопления

Цель лабораторной работы – определение удельного теплового потока и показателя теплового напряжения металла для отопительных приборов двух типов: секционного алюминиевого радиатора и стального панельного радиатора, сравнение их эффективности при различных режимах работы.

Основы теории. Интенсивность переноса тепла от теплоносителя (воды) в отапливаемое помещение через стенки отопительного прибора характеризуют *коэффициентом теплопередачи* $k_{пр}$, Вт/(м^2°С). Данный показатель является индивидуальным для каждой модели отопительных приборов. Индивидуальность определяется тем, что у разных моделей процесс теплопереноса осуществляется разными по интенсивности механизмами: от воды к стенке прибора - конвекцией и теплопроводностью, через стенку - только теплопроводностью, а от стенки в помещение - конвекцией, радиацией и теплопроводностью.

Основным механизмом, который определяет величину коэффициента теплопередачи отопительного прибора, является *конвективная теплоотдача*. Коэффициент конвективной теплоотдачи в воздух помещения $\alpha_к$, Вт/(м^2°С), значительно меньше (более чем в 10 раз), чем от воды к стенке, что является ограничителем эффективности прибора [1]. Обычно теплоотдачу конвекцией увеличивают за счет увеличения *теплоотдающей (внешней) поверхности* отопительного прибора путем устройства ребер, пластин, полых вертикальных воздушных каналов.

На коэффициент теплопередачи влияют и другие факторы, такие как расход воды, температурный напор при эксплуатации прибора, структура покрытий, нанесенных на внутреннюю и внешнюю поверхности, вид и конструктивные особенности, приданные прибору при его разработке.

Так, вид отопительного прибора позволяет заранее судить о возможной величине коэффициента теплопередачи. На рис. 1.1 для основных видов приборов показаны области значений коэффициента теплопередачи при одних и тех же температурных условиях [2]. Для гладкотрубных приборов характерны сравнительно высокие, для

секционных радиаторов - средние, для конвекторов и ребристых труб - низкие значения коэффициента теплопередачи. В пределах каждой области значение $k_{пр}$ изменяется в зависимости от конструктивных особенностей прибора того или иного типа.

Основным фактором, определяющим величину $k_{пр}$ в эксплуатационных условиях, является *температурный напор* $\Delta t_{ср}$, т.е. разность между средней температурой теплоносителя и температурой окружающей среды, °С

$$\Delta t_{ср} = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2} - t_{в} \ , \qquad (1.1)$$

где $t_{вх}$, $t_{вых}$, $t_{в}$ – соответственно, температура воды на входе и выходе из отопительного прибора и воздуха в помещении, °С.

При этом наибольшему температурному напору соответствует наивысшее значение коэффициента теплопередачи (см. пунктирные линии на рис. 1.1).

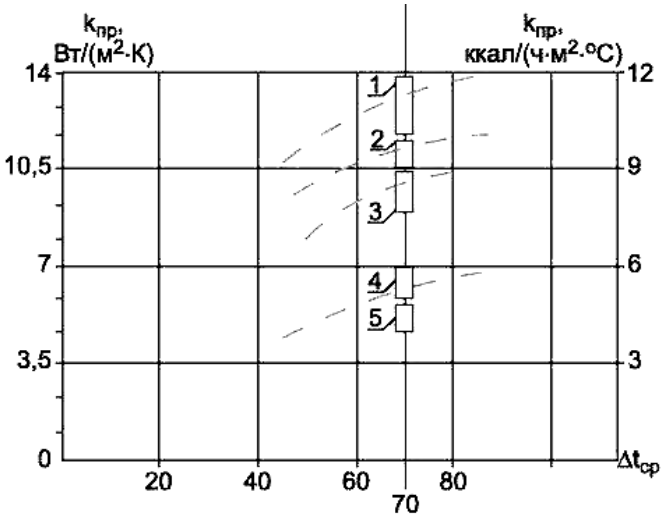

Рис. 1.1. Области значений коэффициента теплопередачи отопительных приборов при $\Delta t_{ср}$=70 °С [2]: 1 - гладкотрубных приборов; 2 - радиаторов панельных; 3 - радиаторов секционных; 4 - конвекторов; 5 - ребристых труб.

Влияние *расхода* теплоносителя на коэффициент $k_{пр}$ различно у разных отопительных приборов. В частности, у радиаторов в зависимости от расхода и геометрии каналов изменяются скорость и режим течения воды, т.е. условия теплообмена на его внутренней поверхности. Кроме того, изменяется равномерность температурного поля на внешней поверхности прибора. На равномерности температурного поля на внешней поверхности радиаторов отражается также характер циркуляции воды внутри прибора, связанный с местами ее подвода и отведения (вверху или внизу прибора), т.е. *способ соединения* радиаторов с трубопроводами.

Состав и цвет защитных и красящих покрытий тоже могут 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%, нанесение алюминиевой краски, растворенной в нитролаке, уменьшает ее на 8,5%. Влияние окраски связано также с конструкцией прибора. Нанесение алюминиевой краски на поверхность панельного радиатора (прибора с повышенным излучением) снижает теплопередачу на 13%. Окраска конвекторов и ребристых труб незначительно влияет на их теплопередачу [2]. Таким образом, за счет окраски прибора, его теплоотдача может изменяться от +2,2% до -13%.

Среди прочих факторов на коэффициент теплопередачи влияют:

- скорость движения воздуха у внешней поверхности прибора. При установке прибора у внутреннего ограждения $k_{пр}$ повышается за счет усиления циркуляции воздуха в помещении;

- способ установки и наличие конструкций, огораживающих прибор. Коэффициент теплопередачи уменьшается при переносе свободно установленного прибора в нишу стены. Декоративное ограждение прибора, выполненное без учета теплотехнических требований, может значительно уменьшить $k_{пр}$;

- качество обработки внешней поверхности, загрязненность внутренней поверхности, наличие воздуха в приборах и другие эксплуатационные факторы.

Производители отопительных приборов приводят значения $k_{ном}$, которые получены при *номинальных (стандартных) условиях*: температура воздуха в испытательной камере $t_в$=18°С, температурный напор $\Delta t_{ном}$=70°С, расход теплоносителя через прибор $G_{ном}$ = 0,1 кг/с (360 кг/ч).

Для пересчета на *реальные условия эксплуатации* результаты испытаний приборов представляют в виде эмпирической зависимости:

$$k_{пр} = k_{ном} \Delta t_{ср}^{n} \overline{G}^{p}, \qquad (1.2)$$

где n, p – экспериментальные числовые показатели, выражающие влияние конструктивных и гидравлических особенностей прибора на его коэффициент теплопередачи; $\overline{G}$ – относительный расход воды в приборе, связывающий изменение коэффициента теплопередачи с гидравлическим режимом в приборе и степенью равномерности температурного поля на внешней поверхности прибора

$$\overline{G} = \frac{G_{пр}}{0{,}1}. \qquad (1.3)$$

Для установления численных значений показателей степени n и p проводят серии опытов по определению $k_{пр}$, меняя температуру воды на подаче при $G_{пр}=const$, и серии опытов с изменением расхода при $\Delta t_{ср}=const$. Далее используется методика графической обработки опытных данных в логарифмических координатах.

Так, при $G_{пр}=const$ результаты опытов представляют в координатах $lgk_{пр}$ и $lg\dfrac{\Delta t_{ср}}{\Delta t_{ном}}$ (рис. 1.2). В этих координатах экспериментальные точки лежат практически на прямой и легко аппроксимируются линейной зависимостью:

$$lgk_{пр} = lgk* + nlg\frac{\Delta t_{ср}}{\Delta t_{ном}},$$

Значение $lgk*$ определяется точкой пересечения аппроксимирующей прямой линии с осью ординат, а коэффициент n представляет собой $tg\varphi$ угла наклона прямой.

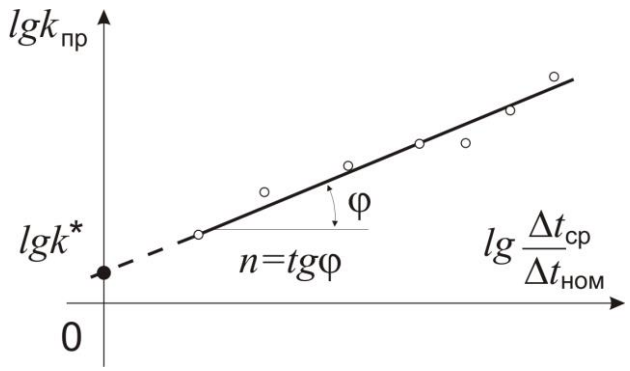

Рис.1.2. График зависимости $lgk_{пр} = f(lg\dfrac{\Delta t_{ñð}}{\Delta t_{íîì}})$.

Аналогично определяется показатель степени p, если по результатам опытов при $\Delta t_{ср} = const$ построить зависимость вида

$$lg\left(\frac{G_{пр}}{0{,}1}\right) = f\left[lg\frac{k_{пр}}{\left(\dfrac{\Delta t_{ср}}{70}\right)^{n}}\right].$$

Эффективность отопительного прибора определяет не только интенсивность теплоотдачи, но и экономичность: количество затраченного на него металла M, кг, и *тепловое напряжение металла* прибора:

$$m = \frac{Q_{пр}}{\Delta t_{ср} \cdot M} \ , \qquad (1.4)$$

Чем больше m, тем более экономичен прибор по расходу металла.

При необходимости сравнить эффективность приборов разного типа определяют и сравнивают значения *поверхностной плотности теплового потока* прибора $q_{пр}$, Вт/м^2

$$q_{пр} = k_{пр} \Delta t_{ср} \qquad (1.5)$$

или его теплоотдачи (*теплового потока*), Вт

$$Q_{пр} = q_{пр} A_{пр} = k_{пр} A_{пр} \Delta t_{ср} \, . \qquad (1.6)$$

Величина $q_{пр}$ приводится в паспорте на отопительный прибор, а также в «Рекомендациях по проектированию систем отопления…» [3]. Пересчитать действительный тепловой поток прибора $Q_{пр}$ в номинальный $Q_{ном}$ и наоборот можно из соотношения

$$Q_{ном} = \frac{Q_{пр}}{\left(\Delta t_{ср} / 70\right)^{1+n} \left(G_{пр} / 0.1\right)^{p}} \, . \qquad (1.7)$$

На стенде «Системы отопления и отопительные приборы» в Центре «SYSTEMS» значение $k_{пр}$ определяется экспериментально на основе совместного решения уравнения теплового баланса

$$Q_{пр} = 0.278 c G_{пр} \left(t_{вх} - t_{вых}\right) \qquad (1.8)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q_{пр} = k_{пр} A_{пр} \Delta t_{ср} \ , \qquad (1.9)$$

где c – удельная массовая теплоемкость воды, равная 4187 Дж/кг°С; $G_{пр}$ – количество теплоносителя, проходящего через отопительный прибор, кг/с; $A_{пр}$ – площадь теплоотдающей поверхности отопительного прибора, м^2.

Из уравнений (1.8) и (1.9)

$$\kappa_{пр} = \frac{c G_{пр} \left(t_{вх} - t_{вых}\right)}{A_{пр} \left(\frac{\left(t_{вх} + t_{вых}\right)}{2} - t_{в} \right)} . \qquad (1.10)$$

При испытаниях прибора на стенде необходимо учитывать, что температура воздуха в боксе Б устанавливается не только за счет теплоотдачи отопительного прибора, но и за счет теплоотдачи нагретых труб подводок, к которым непосредственно присоединен отопительный прибор, а также тепла транзитного теплопровода.

Суммарную теплоотдачу теплопроводов $Q_{тр}$, Вт, находят по формуле:

$$Q_{тр} = \mu \cdot k_{тр} \cdot d_{тр} \cdot l(t_{вод} - t_в), \qquad (1.11)$$

где $k_{тр}$, $d_н$, l – соответственно, коэффициент теплопередачи (Вт/(м^2°С)), наружный диаметр (м) и длина (м) отдельных теплопроводов; $t_{вод}$ и $t_в$ – температура воды в трубе и воздуха в боксе, °С; μ - поправочный коэффициент, учитывающий долю теплоотдачи труб, влияющую на температуру воздуха в боксе, μ = 0.7.

Теплоотдачу теплопроводов можно определить приближенно по формуле:

$$Q_{тр} = q_{вер} \cdot l_{вер} + q_{гор} \cdot l_{гор}, \qquad (1.12)$$

где $q_{вер}$ и $q_{гор}$ – удельные теплопоступления от 1 погонного метра вертикально и горизонтально расположенных труб, Вт/м, определяемые по Приложению при разности температур $\Delta t = t_{вод} - t_в$; $l_{вер}$ и $l_{гор}$ – длина труб, м

Порядок проведения работы

а) определение эффективности отопительных приборов при изменении расхода теплоносителя.

1. Запустить модули А и Б, включить освещение в боксе Б и систему вентиляции модуля.

2. Включить ПК и запустить программу контроля параметров стенда на мониторе компьютера (модуль А).

3. На трубопроводах модулей А и Б закрыть соответствующие шаровые краны и собрать схему, обеспечивающую движение воды в отопительном контуре только через секционный прибор 14 (рис. 1.3).

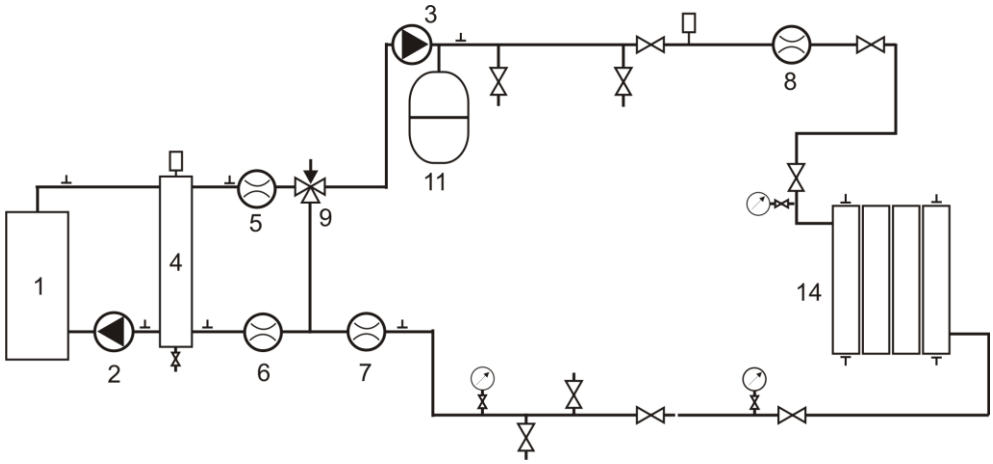

Рис. 1.3. Схема лабораторной работы с секционным радиатором

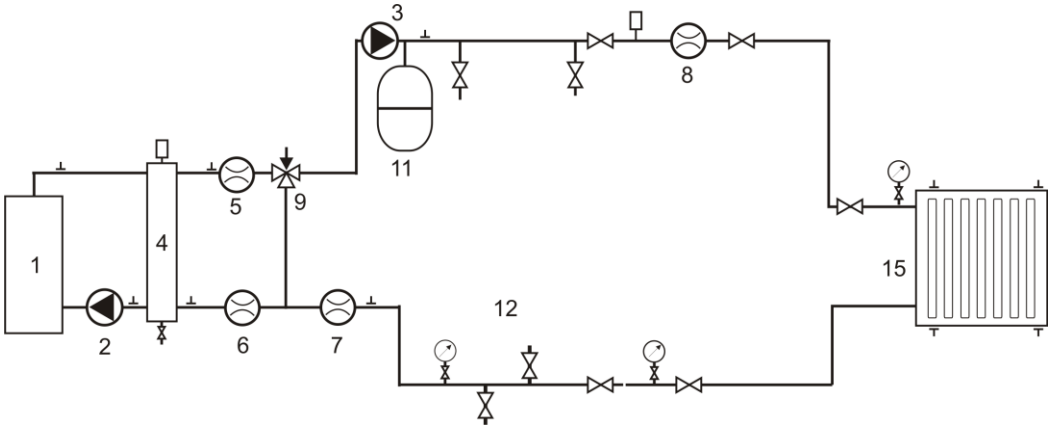

Рис. 1.4. Схема лабораторной работы с панельным радиатором

4. На модуле А включить электрокотел на III ступень мощности. Установить на его регуляторе температуру горячей воды на максимум.

5. Выставить переключатель режима (скорости) работы насоса 3 в позицию «I», обеспечивающую минимальный расход теплоносителя в отопительном контуре.

6. После достижения стационарного режима (~10 мин) с помощью компьютерной программы определить показания электронных термометров: температуры воды в подающей $t_г$ и обратной подводках $t_о$, температуру воздуха в боксе $t_в$, внести полученные измерения в табл. 1.1.

7. С помощью индикатора расхода 8 определить объемный расход воды $L_{пр}$, м^3/с, проходящий через отопительный прибор 14. Внести полученное значение расхода в табл. 1.1.

9. Выставить переключатель режима работы насоса 3 в позицию «II», для увеличения расхода теплоносителя в отопительном контуре. Повторить пункты 6÷7 проведения работы.

10. Выставить переключатель скорости насоса 3 в позицию «III», для достижения максимального расхода теплоносителя в отопительном контуре. Повторить пункты 6÷7 проведения работы.

11. Отключить электронагреватель. Через некоторое время (~5 мин) выключить модуль А.

12. Повторить пункты проведения работы для прибора поз. 15 при трех расходах теплоносителя (см. рис. 1.4).

б) определение эффективности отопительных приборов при изменении температурного напора.

Измерения параметров выполняются в условиях стационарного режима. Стационарный режим фиксируется по постоянству значений величин расхода и температур. Достижение стационарного режима происходит при установлении равенства мощностей теплогенератора и отопительного прибора. Поэтому опыты следует проводить, начиная с

небольших температур на входе в систему. Температура на входе в систему устанавливается вручную с помощью регулятора на электрокотле.

1. На трубопроводах модулей А и Б закрыть соответствующие шаровые краны и собрать схему, обеспечивающую движение воды в отопительном контуре только через секционный радиатор 14 (рис. 1.3).

2. На модуле А включить электрокотел на максимальную ступень мощности. Установить на его регуляторе начальную температуру горячей воды на уровне 40°С.

3. Выставить переключатель скорости насоса 3 в позицию «III», обеспечивающую максимальный расход теплоносителя в отопительном контуре.

5. С помощью индикатора расхода 8 определить объемный расход воды $L_{пр}$, м^3/с, проходящий через отопительный прибор 14. Внести полученное значение расхода в табл. 1.1.

4. После достижения стационарного режима (~10 мин) с помощью компьютерной программы определить показания электронных термометров: температуры воды в подающей $t_г$ и обратной подводках $t_о$, температуру воздуха в боксе $t_в$. Внести полученные измерения в табл. 1.1.

5. Установить на регуляторе электрокотла новую температуру горячей воды (шаг изменения температуры в опытах рекомендуется принять в 10°С). После достижения стационарного режима внести полученные измерения в табл. 1.1. Повторить эксперимент еще 4 раза.

6. Отключить электронагреватель. Через некоторое время (~5 мин) выключить модуль А.

7. Повторить пункты проведения работы для прибора поз. 15 (рис. 1.4).

Таблица 1.1

Тип отопительного прибора	№ оп.	Температура, °С				ρ, кг/м^3	Расход		$к_{пр}$ Вт/м^2°С	$Q_{пр}$ Вт	$q_{пр}$ Вт/м^2
		$t_г$	$t_о$	$t_в$	$\Delta t_{пр}$		$L_{пр}$ м^3/с	$G_{пр}$ кг/с			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Зависимость от расхода теплоносителя											
Секцион. радиатор	1										
	2										
	3										
Стальной панельный радиатор	1										
	2										
	3										
Зависимость от температурного напора прибора											
Секцион. радиатор	1										
	2										
	3										
	4										
	5										

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Стальной панельный радиатор	1										
	2										
	3										
	4										
	5										

По данным табл. 1.1 строятся графики зависимостей: $q_{пр} = f(G_{пр})$; $q_{пр} = f(\Delta t_{пр})$. По построенным графикам сравниваются величины удельных тепловых потоков секционного алюминиевого радиатора и стального панельного радиатора при различных режимах работы. Делается вывод о более высокой эффективности одного из двух видов конструкций исследуемых отопительных приборов по интенсивности теплоотдачи.

В табл. 1.2 вносятся основные характеристики отопительных приборов из паспортных данных или рекомендаций по проектированию систем отопления [3]. По данным табл. 1.2 сравниваются показатели теплового напряжения металла для секционного алюминиевого радиатора и панельного радиатора, и определяется тип отопительного прибора с меньшим расходом металла.

Таблица 1.2

Тип прибора	Высота, мм	Длина, мм	Глубина, мм	Масса, кг	Площадь поверхности нагрева, м^2	n	p	$Q_{ном}$, кВт	Теплонапряженность металла прибора, кВт/кг°С	Удельная материалоемкость кг/кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Контрольные вопросы.

1. Какие факторы влияют на теплоотдачу отопительного прибора?
2. Можно ли утверждать, что увеличение расхода теплоносителя всегда приводит к увеличению тепловой мощности отопительного прибора?
3. Какие способы регулирования мощности приборов существуют в отопительных системах?
4. Что такое номинальный тепловой поток отопительного прибора? Как его определяют?
5. Какие параметры определяют теплотехнические качества отопительного прибора? Что они характеризуют?
6. Каков физический смысл показателя теплового напряжения металла прибора?

Лабораторная работа № 2

Определение линейного коэффициента теплопередачи трубопровода

Целью работы является экспериментальное определение линейного коэффициента теплопередачи змеевика из металлопластиковых труб.

Основы теории. В системах отопления стали широко применяться *металлопластиковые трубы*. Основное их преимущество по сравнению со стальными – это отсутствие коррозии, что увеличивает срок службы (50 лет) и небольшой вес, что облегчает монтаж. Такие трубы в виде змеевика могут использоваться и как каналы в бетонных отопительных панелях и в системах «теплый пол». Важной характеристикой змеевика из металлопластиковых труб (далее - змеевика) является линейный коэффициент теплопередачи.

Линейный коэффициент теплопередачи, численно равный количеству теплоты, проходящей через стенку трубы длиной 1 м в единицу времени от горячей воды к внутреннему воздуху при разности температур между ними в 1°С, определяется по формуле:

$$\kappa_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \text{ Вт/(м}^2\text{С)}, \qquad (2.1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы, Вт/(м^2°С); d_1 – внутренний диаметр трубы, м; d_2 – наружный диаметр трубы, м; λ – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/м°С [4]; α_2 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности трубы к внутреннему воздуху помещения, Вт/(м^2°С).

Для определения α_1 используется критерий Нуссельта

$$Nu_{ж} = \frac{\alpha_1 d_1}{\lambda_{ж}}, \qquad (2.2)$$

где $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре, Вт/м°С [4].

Коэффициент α_1 для прямых труб вычисляется по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{ж}\,\lambda_{ж}}{d_1}. \qquad (2.3)$$

Численное значение коэффициента теплоотдачи α_1 для изогнутых труб змеевика (калачей) находится из следующего соотношения:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{ж}\,\lambda_{ж}}{d_1}\left(1 + 1{,}77\frac{d_1}{R}\right), \qquad (2.4)$$

где R – радиус закругления трубы, м.

Критерий *Nu* при *теплоотдаче от воды к внутренней поверхности труб* можно определить по формулам:

- при вынужденном вязкостном ламинарном движении в трубах ($Re_ж < 2300$, $Gr_ж \cdot Pr_ж < 8 \cdot 10^5$)

$$Nu_{ж,d_1} = 0{,}15 Re_{ж,d_1}{}^{0,33} Pr_ж{}^{0,43} \left(Pr_ж / Pr_{ст}\right)^{0,25}. \qquad (2.5)$$

- при турбулентном движении в трубах ($Re_{ж,d_1} > 10^4$):

$$Nu_{ж,d_1} = 0{,}021 Re_{ж,d_1}{}^{0,8} Pr_ж{}^{0,43} \left(Pr_ж / Pr_{ст}\right)^{0,25}. \qquad (2.6)$$

В формулах (2.5) и (2.6) используется критерий Прандтля *Pr*, который можно определить по табличным данным [4] при температуре воды ($Pr_ж$) и температуре внутренней стенки ($Pr_{ст}$).

Для расчета *Nu* также необходимо знать режим движения горячей воды в змеевике, который определяется по численному значению критерия Рейнольдса:

$$Re_ж = \frac{\omega d_1}{\nu}, \qquad (2.7)$$

где ν – кинематическая вязкость воды при средней температуре, м/с [4]; ω – скорость движения воды по трубе змеевика, м/с.

Скорость движения воды вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{4G}{\rho \pi d_1{}^2}, \qquad (2.8)$$

где *G* – расход воды в трубе змеевика, кг/с; *ρ* – плотность воды при средней температуре, кг/м^3 [4].

Теплоотдача при *свободном движении воздуха около горизонтальных труб* при $10^3 < (Gr_{ж,d_2} \cdot Pr_ж) < 10^8$ описывается критериальным уравнением следующего вида:

$$Nu_{в,d_2} = 0{,}5 \left(Gr_{в,d_2} \frac{Pr_в}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \qquad (2.9)$$

где $Gr_{в,d_2}$ – критерий Грасгофа

$$Gr_{в,d_2} = \frac{g\, d_2\, \beta\, \Delta t}{\nu_в{}^2}, \qquad (2.10)$$

$\beta = \frac{1}{T_в}$; $\Delta t = t_{ст} - t_в$ – разница между температурой наружной стенки трубы и температурой окружающего воздуха; $T_в$ – температура воздуха,°С;

$Pr_в$, $Pr_{ст}$ – критерии Прандтля при температуре воздуха и температуре стенки, соответственно [4]; $Nu_{в,d_2} = \frac{\alpha_2 d_2}{\lambda_в}$; $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воздуха при $t_в$ [4].

Тогда коэффициент теплоотдачи α_2 для уравнения (2.1) вычисляется из соотношения:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{в,d_2} \lambda_в}{d_2}. \qquad (2.11)$$

На стенде «Системы отопления и отопительные приборы» в Центре «SYSTEMS» линейный коэффициент теплопередачи можно получить *экспериментально* из уравнения теплопередачи, определяющего количество теплоты Q, переданное от воды к окружающему змеевик воздуху:

$$Q = к_l \pi l (t_ж - t_в), \qquad (2.12)$$

где l – длина трубы змеевика, м.

Это же количество теплоты может быть найдено из уравнения теплового баланса для воды:

$$Q = G \cdot c\left(t_{ж_1} - t_{ж_2}\right), \qquad (2.13)$$

где c – теплоемкость воды при средней температуре, Дж/кг°С; $t_{ж_1}$ – температура воды на входе в змеевик, °С; $t_{ж_2}$ – температура воды на выходе из змеевика, °С.

Экспериментальный линейный коэффициент теплопередачи змеевика с учетом этих двух уравнений будет равен:

$$к_{l,э} = \frac{G c\left(t_{ж_1} - t_{ж_2}\right)}{\pi l \left(t_ж - t_в\right)}, \qquad (2.14)$$

где $t_ж = \frac{t_{ж_1} + t_{ж_2}}{2}$ – средняя температура воды, протекающей в змеевике.

<u>Порядок проведение опытов.</u>

1. Запустить модуль А. Опыт проводится на модели «теплый пол» 13 из металлопластиковых труб. Характеристики трубы: d_1 = 10 *мм*, d_2 = 16 *мм*, λ = 0,03 Вт/м°С.

2. Включить ПК и запустить программу контроля параметров стенда на мониторе компьютера (модуль А).

3. На трубопроводах модуля А и Б закрыть соответствующие шаровые краны и собрать схему, обеспечивающую движение воды в отопительном контуре только через «теплый пол» 13 (рис. 2.1).

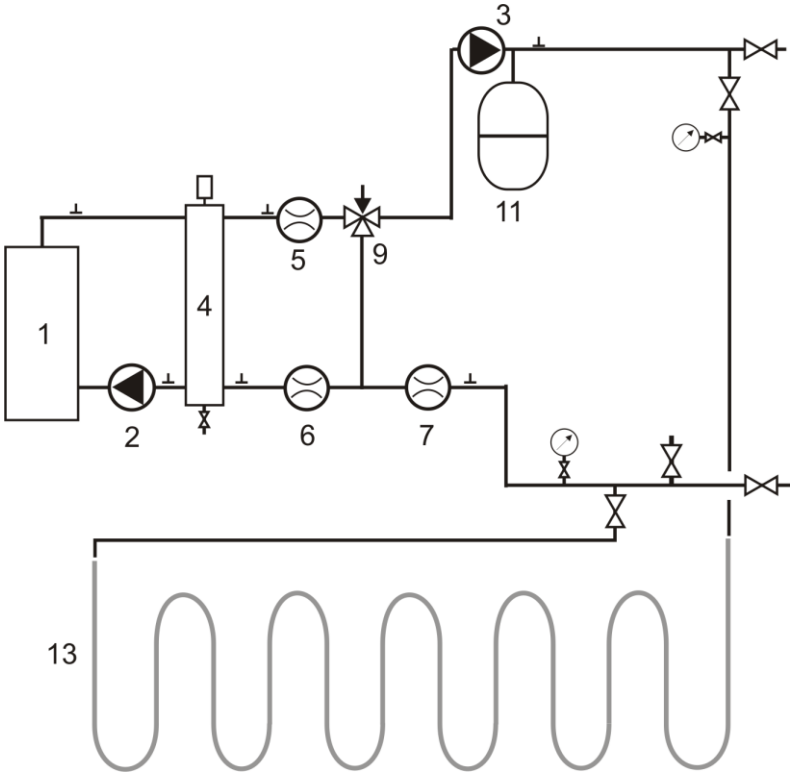

Рис. 2.1. Схема лабораторной работы по определению $\kappa_{l,э}$ горизонтального змеевика

4. На модуле А включить электрокотел на 3 ступени мощности. Установить на его регуляторе температуру горячей воды на максимум.

5. Выставить переключатель режима (скорости) работы насоса 3 в позицию «III», обеспечивающую максимальный расход теплоносителя в отопительном контуре.

6. После достижения стационарного режима (~10 мин) с помощью компьютерной программы определить показания электронных термометров: температуры воды в подающей $t_г$ и обратной подводках $t_о$, внести полученные измерения в табл. 1.

7. С помощью индикатора расхода 7 определить объемный расход воды $L_{пр}$, м^3/с, проходящий через «теплый пол» 13. Внести полученное значение расхода в табл. 2.1.

8. Эксперимент провести при 5 разных расходах воды через змеевик, который устанавливается с помощью шарового крана на «обратке».

9. Отключить электронагреватель. Через некоторое время (~5 мин) выключить модуль А.

По расходу воды, найденному в опыте, с помощью формулы (2.9) вычисляется скорость движения воды в трубе ω. Далее определяется численное значение Re по уравнению (2.8). Из формул (2.6) или (2.7) рассчитывается величина критерия Nu и определяется α_1 по (2.4) и (2.5).

Из соотношения (2.11) находится $Gr_{в,d_2}$. Подставляя найденные значения $Gr_в$, $Pr_в$, $Pr_{ст}$ в уравнение (2.10), рассчитываем $Nu_{в,d_2}$. Из (2.12) определяем α_2. Из соотношения (2.1) вычисляем κ_l и сравниваем с $\kappa_{l,э}$, найденным экспериментально по формуле (2.15).

Результаты замеров и расчетов сводятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№	G кг/с	ω м/с	$t_{ж_1}$ ^{0}C	$t_{ж_2}$ ^{0}C	$t_{ж}$ ^{0}C	Re	$Pr_ж$	$Pr_{ст}$	$Nu_ж$	$Nu_в$	α_1 $\frac{Вт}{м^2С}$	α_2 $\frac{Вт}{м^2С}$	κ_l $\frac{Вт}{м^2С}$	$\kappa_{l\,э}$ $\frac{Вт}{м^2С}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16

Контрольные вопросы

1. По какому соотношению определяется линейное термическое сопротивление змеевика?
2. Как влияет радиус закругления трубы на теплоотдачу змеевика?
3. От чего зависят коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2?
4. Какие основные конструкции «теплого пола» вам известны?

Лабораторная работа №3
Определение кпд тепловой изоляции трубопровода

Цель работы: Оценка влияния тепловой изоляции на теплопотери медных отопительных труб.

Основы теории. При перемещении теплоносителя по трубам, проложенным в неотапливаемых помещениях, может значительно понизиться температура горячей воды (водяное отопление) и бесполезно сконденсироваться часть пара (паровое отопление). Для уменьшения бесполезных теплопотерь отопительные трубы в неотапливаемых помещениях покрывают тепловой изоляцией.

Толщину слоя тепловой изоляции $\delta_{из} = 0.5(d_{нар} - d_{вн})$ определяют исходя из его термического сопротивления

$$R_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}, \qquad (3.1)$$

где $d_{нар}$, $d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметр изоляции, м; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/м°С.

Термическое сопротивление теплоизоляции $R_{из}$ должно соответствовать допустимому значению $R_{из}^{доп}$ или рекомендуемой теплоотдаче с поверхности труб q_{req}. Так, величина $R_{из}^{доп}$ для систем отопления должна быть не менее 0.86 м^2°С/Вт для труб $d_y \leq 25$ мм и 1.22 м^2°С/Вт для труб $d_y > 25$ мм.

Качество тепловой изоляции трубопровода оценивается *коэффициентом полезного действия* (коэффициентом эффективности):

$$\eta_{из} = \frac{q_{неиз} - q_{из}}{q_{из}}, \qquad (3.2)$$

где $q_{неиз}$ и $q_{из}$ – теплопотери 1 погонным метром труб с неизолированной и изолированной поверхностью, соответственно, Вт/м. Коэффициент эффективности изоляционных конструкций трубопроводов отопления находится обычно в пределах 0.85÷0.95.

Удельные теплопотери отопительного трубопровода с неизолированной и изолированной поверхностью можно определить экспериментально по формуле:

$$q_{из} = cG(t_1 - t_2)/L, \text{ Вт/м}, \qquad (3.3)$$

где c – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·°С; G – расход воды, кг/с; L – длина трубы, м; t_1 и t_2 – температуры в начале и конце рассматриваемого участка трубы, °С.

Проведение опытов. Сравнительное исследование изолированного и неизолированного трубопроводов проводится на отопительном контуре, содержащем змеевик из медных труб 12 (см. рис. 3.1). В опытах сначала определяются потери тепла неизолированного змеевика, а затем - потери тепла змеевика с нанесенной на него трубной теплоизоляцией.

С помощью переключателя скоростей на насосе 3 устанавливаются три разных расхода теплоносителя, измеряемые расходомером 7. Температуры в начале («1») и конце («2») рассматриваемых участков трубопроводов в каждой серии опытов фиксируется в программе по показаниям электронных термометров при достижении стационарного режима, записываются в табл. 3.1.

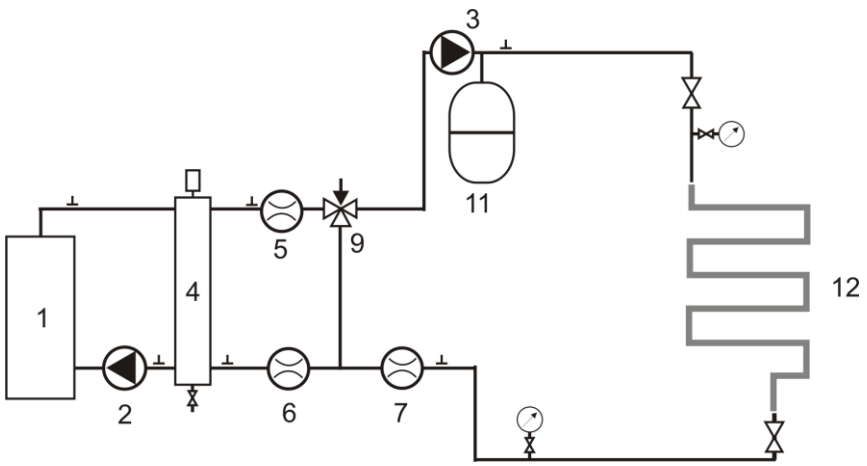

Рис. 3.1. Схема лабораторной работы для определения кпд тепловой изоляции трубопроводов из медных труб

Таблица 3.1

№ опыта	Время измерения, мин	G, кг/с	t_1, °С	t_2, °С	$q_{из}$, Вт/м	$t_в$, °С	Δt, °С	$q_{неиз}$, Вт/м	$\eta_{из}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

По значениям расхода G и температур t_1 и t_2 рассчитывается q для изолированных и неизолированных трубопроводов, и по формуле (3.2) определяется $\eta_{из}$. По зависимости (3.3) строятся графики изменения q при разных скоростях движения воды в медной трубе (пример показан на рис. 3.2).

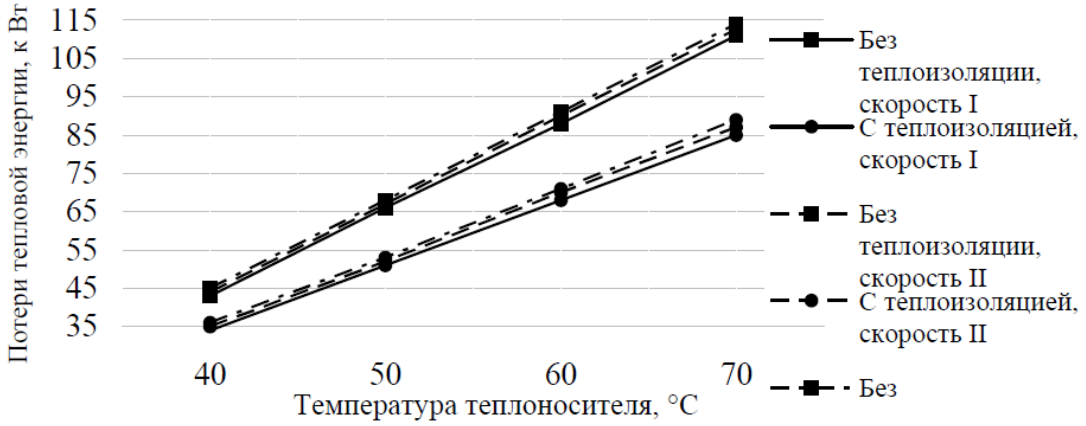

Рис. 3.2. Результаты измерений потерь тепловой энергии в трубопроводе

Контрольные вопросы

1. В каких случаях на трубопроводы системы отопления наносится тепловая изоляция?
2. Какие материалы называются теплоизоляционными?

3. Как определяется коэффициент эффективности изоляционных конструкций трубопроводов? В каком диапазоне его значения можно считать приемлемыми?

Лабораторная работа №4

Определение гидравлического сопротивления приборных узлов

Цель лабораторной работы: исследование влияние режима течения в подводках на сопротивление узлов; построение гидравлической характеристики приборных узлов с отопительными приборами трех типов – секционным алюминиевым радиатором, стальным панельным радиатором и полотенцесушителем.

Основы теории. При расчете однотрубных систем отопления необходимо иметь сведения о гидравлическом сопротивлении приборного узла $\Delta P_у$, Па, величина которого зависит от конструкции приборного узла и скорости течения воды в подводках. Теоретически $\Delta P_у$ можно определить как сумму потерь на прямых участках подводок и на местных сопротивлениях (в приборе, на фитингах и клапанах узла):

$$\Delta P_у = \Delta P_{тр} + \Delta P_м , \qquad (4.1)$$

Местные потери могут быть определены по формуле:

$$\Delta P_м = \Sigma\xi \cdot P_д , \qquad (4.2)$$

где $P_д$ – динамическое давление в трубе подводки к прибору, Па; $\Sigma\xi$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений (кмс) отопительного прибора и фитингов в приборном узле. Значения ξ обычно определяются экспериментально производителем и приводятся в справочной литературе.

Потери давления на трение при движении воды в прямых трубах определяют по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P_{тр} = \frac{\lambda}{D_г}\frac{\rho v^2}{2} l , \qquad (4.3)$$

где λ - коэффициент сопротивления трения; $D_г = 4\frac{F}{П}$ - гидравлический диаметр; F, $П$, l – соответственно, площадь поперечного сечения, смоченный периметр и длина трубы. Для трубы круглого сечения $D_г = d$

$$\Delta P_{тр} = \frac{\lambda}{d}\frac{\rho v^2}{2} l . \qquad (4.4)$$

Значение λ зависит от режима движения воды, то есть от числа Рейнольдса – $\mathrm{Re} = f\left(\frac{vD_г}{\nu}\right)$ и относительной шероховатости стенок трубы – $\frac{k}{d}$ (k – высота выступов шероховатости). Реальная шероховатость труб весьма неравномерна и неоднородна и поэтому в расчетах пользуются *эквивалентной шероховатостью* $k_э$. Это однородная шероховатость, равномерно распределенная по внутренней поверхности трубы, создающая такое же сопротивление трения, как и реальная шероховатость. Таким образом

$$\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{k_э}{d}\right). \qquad (4.5)$$

На рис. 4.1 приведены результаты опытов по определению λ для труб с реальной шероховатостью.

При значениях Re<2000 (lgRe<3.3) – ламинарное течение. Шероховатость трубы не влияет на сопротивление трения. Зависимость (4.5) в этом случае имеет вид

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}. \qquad (4.6)$$

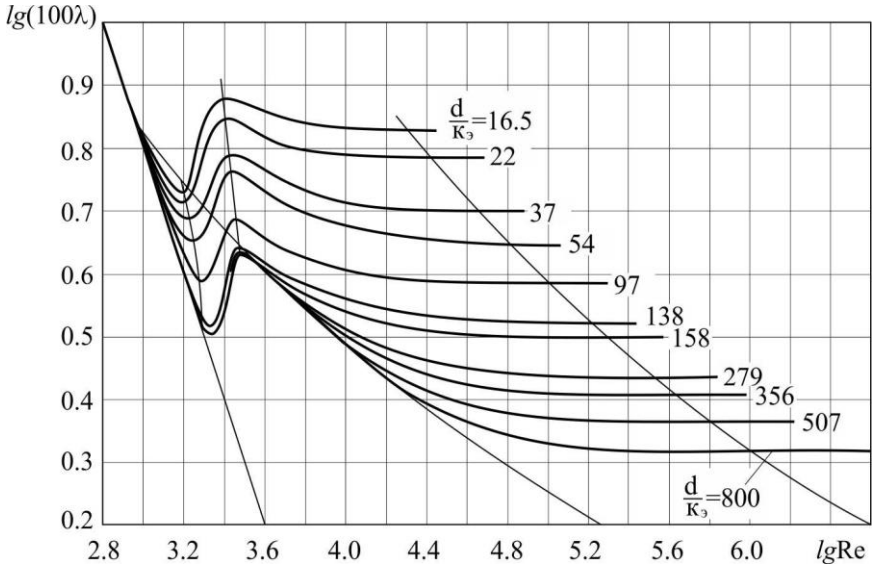

Рис. 4.1. Зависимость $\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{k_э}{d}\right)$ для труб с реальной шероховатостью

Отсюда следует, что при ламинарном режиме сопротивление трению пропорционально скорости. Действительно, объединяя формулы (4.4), (4.6) находим

$$\Delta P_{тр} = \frac{32\rho v l}{d^2} v \,. \qquad (4.7)$$

На участке смены ламинарного режима турбулентным (Re=2000-4000) коэффициент сопротивления зависит от числа *Re* и относительной шероховатости. Потери давления здесь пропорциональны скорости в степени выше двух. Этот закон сопротивления справедлив в некотором интервале значений *Re*. Интервал тем меньше, чем больше относительная шероховатость.

И, наконец, при больших значениях Re сопротивление трения зависит только от шероховатости труб, с увеличением последней возрастает и сопротивление трения. Этот режим полностью развитого турбулентного течения называют еще *квадратичным*, поскольку здесь сопротивление трению, очевидно, пропорционально квадрату скорости. На переходном участке и в квадратичном режиме для определения λ можно использовать приближенную формулу Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{k_э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}25} . \qquad (4.8)$$

На нашем лабораторном стенде перепад давления на приборном узле можно определить экспериментально при разных режимах течения воды, устанавливаемых за счет перекрытия клапана перед прибором. Измеренная потеря давления включает в себя и потерю на трение на участках присоединения подводок от датчиков давления до и после прибора. Поэтому зависимость для кмс приборного узла:

$$\xi = \frac{\Delta P_{ст} - \Delta P_{тр}}{P_д} . \qquad (4.9)$$

<u>Порядок проведения работы.</u>

1. Запустить модули А и Б, включить освещение в боксе Б.

2. Включить ПК и запустить программу контроля параметров стенда на мониторе компьютера (модуль А).

3. На трубопроводах модулей А и Б закрыть соответствующие шаровые краны и собрать схему, обеспечивающую движение воды в отопительном контуре через отопительный прибор (рис. 4.1).

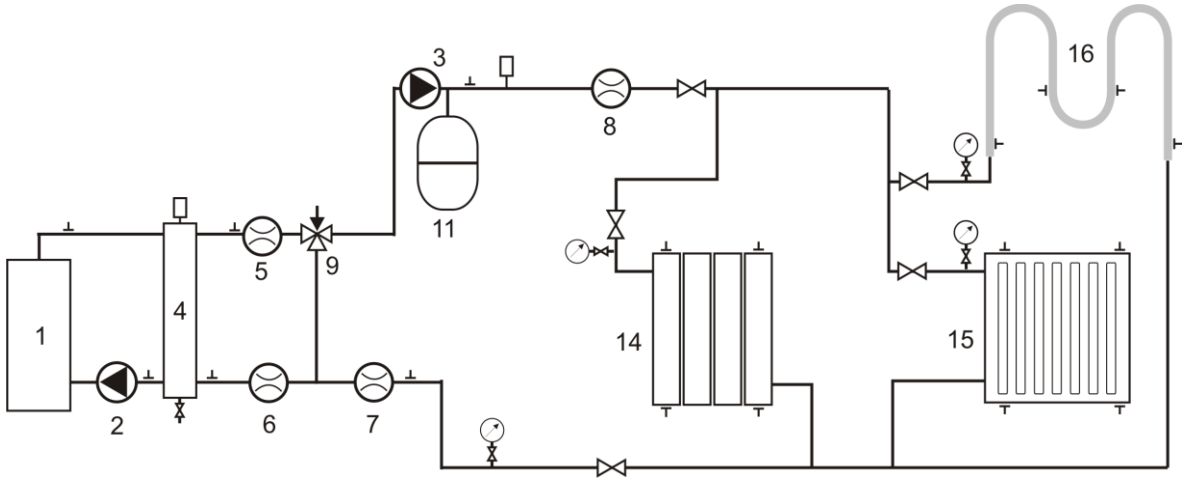

Рис. 4.1. Схема лабораторной работы по определению кмс приборных узлов

4. На модуле А включить электрокотел на I (минимальную) ступень мощности. Установить на регуляторе котла температуру горячей воды на минимум.

5. Выставить переключатель режима (скорости) насоса 3 в позицию «III», обеспечивающую максимальный расход теплоносителя в отопительном контуре.

6. После достижения стационарного режима (~10 мин) с помощью компьютерной программы или приборов на боковой панели 20 определить показания датчика температуры подачи $t_г$, а также датчиков давлений до и после отопительного прибора P_1, P_2. Рассчитать $\Delta P_{ст}$ и внести в табл. 4.1.

7. По показаниям индикатора расхода 8 определить объемный расход воды $L_{пр}$, м^3/с, проходящий через отопительный прибор 14. Определить массовый расход, скорость и динамическое давление перед отопительным прибором, потери давления на трение $\Delta P_{тр}$ на участках, не входящих в приборный узел. Внести полученное значение G, v, $P_д$ и $\Delta P_{тр}$ в табл. 4.1.

8. По формуле (4.10) рассчитать ξ приборного узла.

9. Повторить эксперименты со стальным панельным радиатором 15 и полотенцесущителем 16.

Измерения $L_{пр}$ и $\Delta P_{ст}$ проводятся при 3 режимах работы насоса 3. Если значение Re в опыте меньше чем 10^4, то коэффициент трения нужно определять по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}.$$

Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Секционный радиатор

№ опыта	$L_{пр}$, м^3/с	$t_г$, °С	ρ, кг/м^3	G, кг/с	v, м/с	$P_д$, Па	$\Delta P_{ст}$, Па	Re	λ	$\Delta P_{тр}$, Па	ξ
1	2	3	4	5	3	4	5	6	7	8	9

Панельный радиатор

№ опыта	$L_{пр}$, м^3/с	$t_г$, °С	ρ, кг/м^3	G, кг/с	v, м/с	$P_д$, Па	$\Delta P_{ст}$, Па	Re	λ	$\Delta P_{тр}$, Па	ξ
1	2	3	4	5	3	4	5	6	7	8	9

Полотенцесушитель

№ опыта	$L_{пр}$, м^3/с	$t_г$, °С	ρ, кг/м^3	G, кг/с	v, м/с	$P_д$, Па	$\Delta P_{ст}$, Па	Re	λ	$\Delta P_{тр}$, Па	ξ
1	2	3	4	5	3	4	5	6	7	8	9

Результаты опытов для каждого отопительного прибора представляются в виде графика ξ=ξ (Re) и делается вывод о характере этой зависимости.

Контрольные вопросы.

1. Что является причиной потерь энергии при движении потока жидкости?
2. Каков физический смысл числа Re?
3. Какие режимы течения в трубах Вам известны?
4. От чего зависит коэффициент сопротивления трения на поверхности трубы?
5. Каким образом учитываются в опытах потери на трение в испытываемом элементе?
6. Как определяется коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме?
7. Как определяется коэффициент гидравлического трения при турбулентном режиме?
8. Правильно ли мы делаем, когда при проектировании считаем что ξ не зависит от числа Re?
9. Какие факторы влияют на коэффициент местного сопротивления?
10. Приведите примеры наиболее часто встречающихся местных сопротивлений в системах отопления.
11. Какие местные сопротивления имеются в исследуемом приборном узле системы отопления?
12. Как увеличить гидравлическое сопротивление исследуемого приборного узла?

Лабораторная работа № 5

Определение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора

Цель работы: экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи отопительных приборов при стационарном тепловом режиме.

Основы теории. Коэффициент теплоотдачи отопительного прибора $\alpha_{пр}$, Вт/м^2°С, является сложной функцией различных величин, характеризующих процесс передачи теплоты от нагретой поверхности к воздуху помещения. В общем случае коэффициент теплоотдачи зависит от формы, размеров и температуры поверхностей нагрева прибора, температуры и скорости движения жидкости в нем, а также физических свойств жидкости: коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности, коэффициента вязкости и других факторов. В этой связи $\alpha_{пр}$ отопительного прибора чаще всего определяют экспериментальным путем.

Теплоотдача отопительного прибора при компенсации теплопотерь помещения происходит конвекций и тепловым излучением (радиацией). В зависимости от преобладающего механизма теплоотдачи приборы условно разделяют на *радиаторы* и *конвекторы*. Доля каждой из составляющих теплообмена в общем тепловом потоке отличается у приборов различной конструкции и определяется величиной критериев Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr) и законом Стефана-Больцмана [1]. В конвекторах радиационная составляющая будет крайне мала, так же, как и в радиаторах - доля конвективной составляющей. Так, у конвекторов с кожухом доля радиационного теплообмена составляет 5–10 % от общего теплового потока, а у неоребренных однорядных по глубине панельных радиаторов она достигает 40–45 %.

Экспериментально коэффициент теплоотдачи прибора $\alpha_{пр}$ определяется при *стационарном тепловом режиме* отопительного прибора по известному количеству тепла, отдаваемого отопительным прибором (формула Ньютона–Рихмана)

$$Q_{пр} = \alpha_{пр} A\left(t_{пов} - t_{в}\right), \text{ Вт} \qquad (5.1)$$

где $Q_{пр}$ – тепловая мощность прибора, определяемая по формуле (1.8), Вт; $t_{пов}$ – средняя температура поверхности прибора, °С; $t_{в}$ – средняя температура окружающего воздуха, °С; A – площадь поверхности отопительного прибора (площадь поверхности теплообмена), м^2.

Из уравнения (5.1) следует

$$\alpha_{пр} = \frac{Q_{пр}}{A\Delta t}, \text{ Вт/м}^2\text{°С}. \qquad (5.2)$$

Для определения долей конвективной и радиационной составляющих проводят расчеты в следующей последовательности:

1. Находят суммарную плотность теплового потока прибора q , Вт/м^2:

$$q_{пр} = \frac{Q_{пр}}{A}. \qquad (5.3)$$

2. Определяют плотность теплового потока излучением $q_л$, Вт/м^2:

$$q_л = \varepsilon \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right], \qquad (5.4)$$

где ε – степень черноты материала поверхности прибора (приближенно можно принять по табл. 10 [4]); σ = 5.67·10^{-8} Вт/м^2·К^4 – постоянная Стефана–Больцмана,; $T_{пов}$ – средняя температура поверхности прибора, К; $T_в$ – средняя температура окружающего воздуха, К.

3. Рассчитывают плотность конвективного теплового потока $q_к$, Вт/м^2:

$$q_к = q - q_л. \qquad (5.5)$$

4. При замеренной средней разности температур между нагретой поверхностью и воздухом $\Delta t = t_{пов} - t_в$, ºС определяют коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_к$, Вт/(м^2·ºС)

$$\alpha_к = \frac{q_к}{\Delta t}. \qquad (5.6)$$

Экспериментальный стенд в Центре «SYSTEMS» «Системы отопления и отопительные приборы» позволяет определить коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пр}$ по формуле (5.1), когда известна тепловая мощность и температурный напор, а также рассчитать соотношение между конвективной и радиационной составляющими теплообмена у трех отопительных приборов разной конструкции: секционного алюминиевого радиатора, стального панельного радиатора и полотенцесушителя (рис.5.1).

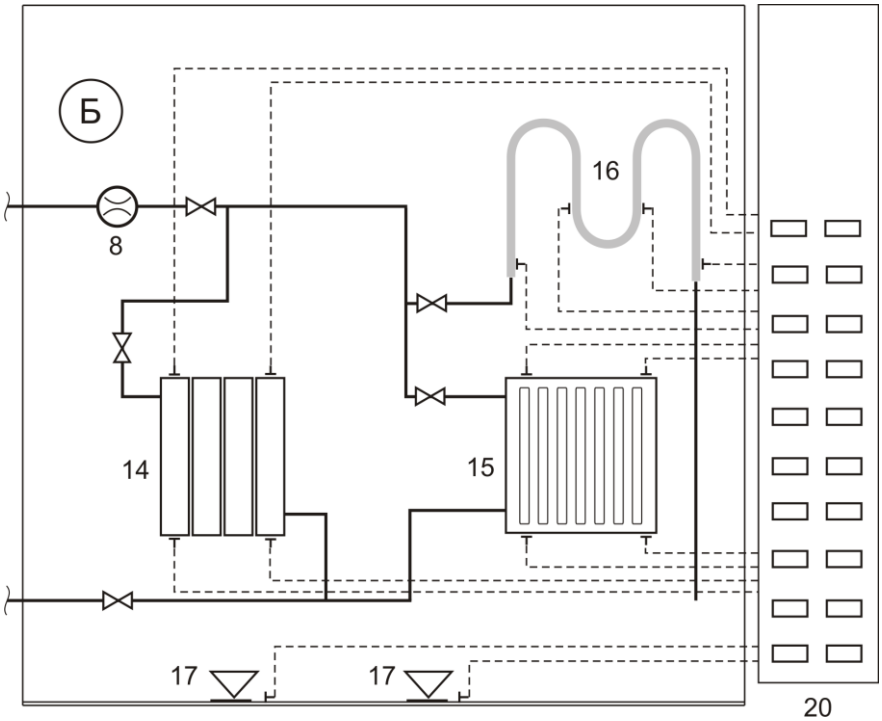

Рис. 5.1. Схема установки термопар в измерительном боксе Б

Расход воды через прибор контролируется по расходомеру 8, температура перед приборами 14, 15 и 16 устанавливается терморегулятором электрокотла. Температура воздуха в боксе Б контролируется по термодатчикам на основе термопар у вытяжных диффузоров 17. Измерение температуры теплоотдающей поверхности осуществляется термодатчиками (по 4 на прибор), расположенными в нижней и верхней части отопительного прибора.

Порядок проведения работы.

1. Запустить модули А и Б, включить освещение в боксе Б и систему вентиляции модуля.

2. Включить ПК и запустить программу контроля параметров стенда на мониторе компьютера (модуль А).

3. На трубопроводах модулей А и Б закрыть соответствующие шаровые краны и собрать схему, обеспечивающую движение воды в отопительном контуре только через секционный прибор 14.

4. На модуле А включить электрокотел на III ступень мощности. Установить на его регуляторе температуру горячей воды на максимум.

5. Выставить переключатель режима (скорости) работы насоса 3 в позицию «III», обеспечивающую максимальный расход теплоносителя в отопительном контуре.

6. После достижения стационарного режима (~10 мин) с помощью компьютерной программы определить показания электронных

термометров: температуры воды в подающей $t_г$ и обратной подводках $t_о$, температуру воздуха в боксе $t_в$, внести полученные измерения в табл. 5.1.

7. С помощью индикатора расхода 8 определить объемный расход воды $L_{пр}$, м^3/с, проходящий через отопительный прибор 14. Внести полученное значение расхода в табл. 5.1.

8. Снять показания термодатчиков на поверхности прибора 14.

9. Повторить пункты проведения работы для приборов 15 и 16.

10. Отключить электронагреватель. Через некоторое время (~5 мин) выключить модуль А.

Опыты с каждым прибором проводятся при трех температурных режимах (близких по $\Delta t_{ср}$ = 30, 50 и 70 °С). Средняя температура поверхности отопительного прибора $t_{пов}$ находится как среднее арифметическое температур всех датчиков:

$$t_{пов} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}, \text{ °C}.$$

Опытные данные записываются в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$t_{вх}$, °С	$t_{вых}$, °С	$t_в$, °С	$\Delta t_{ср}$, °С	$G_{пр}$, кг/с	$Q_{пр}$, Вт	$t_{пов}$, °С	$\alpha_{пр}$, Вт/м^{2}С	q , Вт/м^2	$\alpha_к$, Вт/м^{2}С	$\alpha_л$, Вт/м^{2}С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Контрольные вопросы.

1. От каких конструктивных и эксплуатационных факторов зависит теплоотдача отопительного прибора?
2. От каких теплотехнических и гидравлических характеристик зависит теплоотдача отопительного прибора?
3. В каких случаях наблюдается недостаточная теплоотдача нагревательных приборов?
4. За счет каких факторов можно добиться увеличения теплоотдачи прибора?

Список использованных источников

1. Основы гидравлики и теплотехники: учебное пособие /З.Х.Замалеев, В.Н.Посохин, В.М.Чефанов. – Спб.; М.; Краснодар: Лань, 2019. – 352 с.
2. Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление. – М.: АСВ, 2002. – 576 с.
3. Рекомендации НИИ Сантехники (ООО «Витатерм») по проектированию систем отопления.
4. Справочные таблицы по тепломассообмену / З.Х.Замалеев, М.А. Валиуллин. – Казань: КГАСУ. 2016. – 32 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

Тепловой поток 1 м открыто проложенных *горизонтальных* **металлополимерных труб**

$d_{вн}$ / $d_{нар}$, мм	$d_у$, мм	Θ, °С	Тепловой поток 1 м трубы *q*, Вт/м, при Θ, °С, через 1 °С									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12/16	16	30	20,5	21,4	22,2	23,0	23,9	24,7	25,6	26,4	27,3	28,2
16/20	20		24,8	25,8	26,8	27,8	28,8	29,9	30,9	31,9	33,0	34,0
20/25	25		29,4	30,6	31,8	33,0	34,2	35,4	36,6	37,8	39,1	40,3
12/16	16	40	29,0	29,9	30,8	31,6	32,5	33,4	34,3	35,2	36,1	37,0
16/20	20		35,0	36,1	37,2	38,2	39,3	40,4	41,4	42,5	43,6	44,7
20/25	25		41,5	42,8	44,0	45,3	46,6	47,8	49,1	50,4	51,7	53,0
12/16	16	50	37,9	38,8	39,8	40,7	41,6	42,5	43,4	44,4	45,3	46,3
16/20	20		45,8	46,9	48,0	49,1	50,2	51,4	52,5	53,6	54,7	55,9
20/25	25		54,3	55,6	56,9	58,2	59,5	60,9	62,2	63,5	64,9	66,2
12/16	16	60	47,2	48,2	49,1	50,0	51,0	52,0	52,9	53,9	54,9	55,8
16/20	20		57,0	58,2	59,3	60,4	61,6	62,8	63,9	65,1	66,2	67,4
20/25	25		67,6	68,9	70,3	71,6	73,0	74,4	75,8	77,1	78,5	79,9
12/16	16	70	56,8	57,8	58,8	59,7	60,7	61,7	62,7	63,7	64,7	65,7
16/20	20		68,6	69,8	71,0	72,1	73,3	74,5	75,7	76,9	78,1	79,3
20/25	25		81,3	82,7	84,1	85,5	86,9	88,3	89,7	91,2	92,6	94,0
12/16	16	80	66,7	67,7	68,7	69,7	70,7	71,7	72,7	73,7	74,8	75,8
16/20	20		80,5	81,7	82,9	84,2	85,4	86,6	87,8	89,0	90,3	91,5
20/25	25		95,4	96,9	98,3	99,7	101,2	102,6	104,1	105,5	107,0	108,4

Таблица П.2

Тепловой поток 1 м открыто проложенных *вертикальных* **металлополимерных труб**

$d_{вн}$ / $d_{нар}$, мм	$d_у$, мм	Θ, °С	Тепловой поток 1 м трубы *q*, Вт/м, при Θ, °С, через 1 °С									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12/16	16	30	18,5	19,2	20,0	20,7	21,5	22,2	23,0	23,8	24,6	25,3
16/20	20		21,8	22,7	23,6	24,5	25,4	26,3	27,2	28,1	29,0	29,9
20/25	25		25,3	26,3	27,3	28,4	29,4	30,4	31,5	32,5	33,6	34,6
12/16	16	40	26,1	26,9	27,7	28,5	29,3	30,1	30,9	31,7	32,5	33,3
16/20	20		30,8	31,8	32,7	33,6	34,6	35,5	36,5	37,4	38,4	39,3
20/25	25		35,7	36,8	37,9	39,0	40,0	41,1	42,2	43,3	44,4	45,6
12/16	16	50	34,1	35,0	35,8	36,6	37,4	38,3	39,1	40,0	40,8	41,6
16/20	20		40,3	41,3	42,2	43,2	44,2	45,2	46,2	47,2	48,2	49,2
20/25	25		46,7	47,8	48,9	50,1	51,2	52,3	53,5	54,6	55,8	56,9
12/16	16	60	42,5	43,3	44,2	45,0	45,9	46,8	47,6	48,5	49,4	50,2
16/20	20		50,2	51,2	52,2	53,2	54,2	55,2	56,2	57,3	58,3	59,3
20/25	25		58,1	59,3	60,4	61,6	62,8	64,0	65,2	66,3	67,5	68,7

Продолжение таблицы П.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12/16	16	70	51,1	52,0	52,9	53,8	54,6	55,5	56,4	57,3	58,2	59,1
16/20	20		60,4	61,4	62,4	63,5	64,5	65,6	66,6	67,7	68,7	69,8
20/25	25		69,9	71,1	72,3	73,5	74,7	76,0	77,2	78,4	79,6	80,8
12/16	16	80	60,0	60,9	61,8	62,7	63,6	64,5	65,4	66,4	67,3	68,2
16/20	20		70,8	71,9	73,0	74,1	75,1	76,2	77,3	78,4	79,4	80,5
20/25	25		82,1	83,3	84,5	85,8	87,0	88,3	89,5	90,8	92,0	93,3

Таблица П.3

Тепловой поток 1 м открыто проложенных **полипропиленовых труб**

Размер	Разница между температурой теплоносителя и воздуха,°С							Расположение
	20	30	40	50	60	70	80	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20×3,4	12.1	19.5	27.5	36.3	45,8	55.9	66,7	Гориз.
	10.5	15,7	22.7	30.5	36.5	45.5	51.9	Вертик.
20×2,8	12.7	20.3	28,7	38,0	48,0	58.7	70.3	Гориз.
	10,8	16.2	23.5	31.6	37.9	47.3	54,1	Вертик.
25×4,2	14,6	23.3	32.9	43.3	54.5	66,4	79.1	Гориз.
	12,7	19,0	27.3	36,6	43,9	54.5	62.3	Вертик.
25×3,5	15.3	24,4	34,5	45.5	57.4	70.1	83.6	Гориз.
	13.1	19.7	28,4	38.2	45,8	57.0	65.1	Вертик.
32×5,4	17,7	28,1	39,5	51.8	64,9	78,9	93.6	Гориз.
	15.4	23.1	33.1	44,2	53.1	65,6	80,0	Вертик.
32×4,4	18.7	29,9	42.1	55.4	69.7	84,9	100,9	Гориз.
	16.2	24,3	40,0	46,8	56,1	69.7	79.6	Вертик.
40×6,7	20,9	33.0	46,3	60,5	75.6	91.6	108,4	Гориз.
	18.3	27,5	39.2	52,1	62,6	77.1	88,1	Вертик.
40×5,5	22,2	35.4	49,7	65.2	81,8	99,4	117,9	Гориз.
	19,4	29,1	41.7	55.6	66,7	82.5	94,3	Вертик.
50×8,3	24,4	38.5	53.7	69,9	87.2	105,3	124,2	Гориз.
	21,6	32,4	46,0	60,9	73.1	89,8	102,6	Вертик.
50×6,9	26,1	41,4	58,0	75,9	94,9	114,9	136,0	Гориз.
	22.9	34,4	49,2	63,4	78,4	96.7	110,5	Вертик.
63×10,5	28,2	44,2	61.5	79,9	99,2	119,4	140,4	Гориз.
	25.2	37.8	53.4	70,4	84,5	103,2	118,0	Вертик.
63×8,6	30,8	48,5	67,8	88,3	110,1	132,9	156,8	Гориз.
	27,2	40,8	58,1	76.9	92.2	113,3	129,4	Вертик.
75×12,5	31,5	49,4	68,5	88,6	109,8	131,9	154,8	Гориз.
	28,3	42.5	60,0	78,8	94,5	115,2	113,7	Вертик.
90×15	34,2	53,4	73,7	95.1	117,4	140,6	164,5	Гориз.
	31,2	46,8	65.7	86,0	103,2	125,3	143,1	Вертик.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Указания по выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»

Составители: Сафиуллин Р.Г., Осипова Л.Э., Енюшин В.Н.

Редактор:

Издательство
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать	Печать	Формат 60x84/16
Заказ №	ризографическая	Усл.-печ.л.
Тираж экз.	Бумага офсетная № 1	Уч.-изд.л.

Отпечатано в полиграфическом секторе
Издательства КГАСУ
420043, Казань, Зеленая, 1.