

29-2021

**ИСТОЧНИКИ И СИСТЕМЫ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 13.03.01
«Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)

Воронеж 2021

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теоретической и промышленной теплоэнергетики

ИСТОЧНИКИ И СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 13.03.01
«Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.18(07)
ББК 31.38я7

Составители
А. М. Наумов, А. А. Надеев

Источники и системы теплоснабжения: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.М. Наумов, А.А. Надеев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 29 с.

В методических указаниях приведена последовательность выполнения лабораторных работ по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения»: цель работы, соответствующие теоретические данные, описание лабораторных стендов, порядок проведения опытов для разных режимов работы, порядок обработки полученных результатов. Также приведены контрольные вопросы к каждой работе.

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика») всех форм обучения.

Ил. 8. Табл. 8. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.18(07)
ББК 31.38я7

Рецензент – зав. кафедрой ТПТЭ, канд. техн. наук, доцент В.В. Портнов

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения» предназначены для закрепления и более глубокого изучения лекционного материала, а также получения практического опыта расчёта отдельных элементов тепловой сети и абонентских вводов потребителей тепла, приобретения навыков экспериментальных исследований и обработке полученных данных.

Для выполнения каждой лабораторной работы студент обязан ознакомиться с методическими указаниями и изучить соответствующий теоретический раздел изучаемой дисциплины. Подготовить конспект работы, который включает в себя: название работы; цель работы; краткие теоретические сведения; схему экспериментальной установки; расчётные формулы; таблицы исходных данных и расчётных результатов. Получить разрешение преподавателя на выполнение опытов.

По окончании опытов каждый студент обязан предъявить полученные экспериментальные данные, а после их одобрения привести рабочее место в исходное состояние и приступить к обработке данных. По полученным значениям строятся графические зависимости и делается вывод.

Все расчёты выполняются в Международной системе единиц СИ. По каждой работе студент сдаёт зачёт преподавателю. Студенты, не сдавшие зачёт по двум работам, к выполнению следующих работ не допускаются.

Лабораторные работы предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика». Знания и навыки, полученные при выполнении данных работ, могут быть полезны при изучении дисциплин «Тепловые электрические станции» и «Технологические энергоносители предприятий».

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению работ в лаборатории энергетических систем кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности у преподавателя, ведущего занятия, о чём должна быть сделана запись в журнале инструктажа по технике безопасности. Перед выполнением работ студенты обязаны ознакомиться с данным методическим руководством.

Перед включением лабораторных стендов необходимо проверить исходное положение органов управления и исправность контрольно-измерительного оборудования.

Включение и выключение лабораторных стендов и установок, а также изменение режима работы производятся студентом под наблюдением преподавателя или лаборанта.

В случае возгорания проводки или в других случаях, угрожающих целостности оборудования лаборатории, необходимо немедленно обесточить стенд и сообщить об этом преподавателю или лаборанту. Работать на неисправной установке запрещено.

В случае поражения электрическим током принять меры по освобождению пострадавшего от тока, оказать первую медицинскую помощь, вызвать врача, сообщить о случившемся администрации высшего учебного заведения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЭР

Цель работы: изучение режимов утилизации газообразных вторичных энергоресурсов (ВЭР) в регенеративном теплообменном аппарате с псевдоожигенным слоем промежуточного теплоносителя, методики определения экономии топлива за счёт использования газообразных ВЭР.

Основные теоретические сведения

Используемый в лабораторной установке регенеративный теплообменный аппарат разработан на кафедре теоретической и промышленной теплоэнергетики ВГТУ. Он представляет собой аппарат с псевдоожигенным («кипящим») слоем дисперсного материала.

Псевдоожигенный слой – это состояние слоя дисперсного (зернистого, сыпучего) материала, при котором под влиянием проходящего через него потока газа частицы твёрдого материала интенсивно перемещаются одна относительно другой. В этом состоянии слой напоминает кипящую жидкость, приобретая некоторые её свойства.

Главными достоинствами аппаратов с псевдоожигенным слоем различного технологического назначения, обуславливающими их широкое распространение в различных отраслях промышленности, являются:

- высокоразвитая поверхность контакта фаз, т.е. частиц материала и ожимающего газа;
- текучесть, свойство, позволяющее транспортировать дисперсный материал без применения различных механизмов;
- незначительное гидравлическое сопротивление слоя во всём диапазоне скоростей псевдоожигения;
- выравнивание полей температур и концентраций фаз слоя.

Кольцевое пространство представленного теплообменного аппарата разделено двумя вертикальными перегородками на холодную и горячую рабочие камеры. В нижних частях камер оставлены окна для циркуляции промежуточного теплоносителя – насадки, состоящей из дисперсного материала. Холодный и горячий газы подаются снизу через газораспределительную решётку с наклонными жалюзи, закрытыми сверху сеткой для предотвращения провала дисперсного теплоносителя. Косое вдувание газов в слой дисперсного теплоносителя приводит к его псевдоожигению и направленному перемещению вдоль кольцевой газораспределительной решётки. Таким образом, в данном аппарате отсутствует специальное устройство для перемещения промежуточ-

ного теплоносителя, что является существенным конструктивным достоинством данного теплообменника. Высокий коэффициент межфазного теплообмена (до 500 Вт/(м²·К)), дешевизна, простота и надёжность конструкции позволяют широко использовать этот теплообменник для утилизации теплоты газообразных ВЭР.

В основе расчёта теплообменного аппарата лежат уравнения теплопередачи и теплового баланса:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T; \quad (1.1)$$

$$Q = Q_2 = Q_x, \quad (1.2)$$

где Q – тепловой поток в аппарате, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

ΔT – температурный напор, К;

Q_2, Q_x – количество теплоты, отданное горячим теплоносителем и полученное холодным теплоносителем, Вт.

Количество теплоты для горячего и холодного теплоносителей вычисляется по формулам

$$Q_2 = c_2 \cdot G_2 \cdot (t'_2 - t''_2); \quad (1.3)$$

$$Q_x = c_x \cdot G_x \cdot (t''_x - t'_x), \quad (1.4)$$

где G_2, G_x – массовый расход горячего и холодного теплоносителей, кг/с;

c_2, c_x – массовая теплоёмкость горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К);

t'_2, t''_2, t'_x, t''_x – начальная и конечная температура горячего и холодного теплоносителей, °С.

Показателем теплового совершенства теплообменника является его коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\max}}, \quad (1.5)$$

где Q_{\max} – максимально возможное количество теплоты, которое может быть передано от горячего теплоносителя к холодному, Вт.

Максимальное количество теплоты вычисляется по формуле

$$Q_{\max} = c_2 \cdot G_2 \cdot (t'_2 - t'_x). \quad (1.6)$$

Степень совершенства теплоизоляции аппарата характеризуется величиной:

$$\eta_u = 1 - \frac{Q_0}{Q}. \quad (1.7)$$

Описание конструкции лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 1.1) состоит из двух высоконапорных вентиляторов 1, электрокалорифера 2, регенеративного теплообменного аппарата 6, приборов для измерения расхода 4 и температуры холодного и горячего воздуха 3, а также приборов для измерения перепада давления в «горячей» и «холодной» камерах теплообменника 5. Расход воздуха регулируется с помощью заслонок 7, установленных во всасывающей патрубке вентилятора. Температура горячего воздуха регулируется изменением напряжения на нагревательных элементах калорифера 2 с помощью автотрансформатора (на схеме не показан).

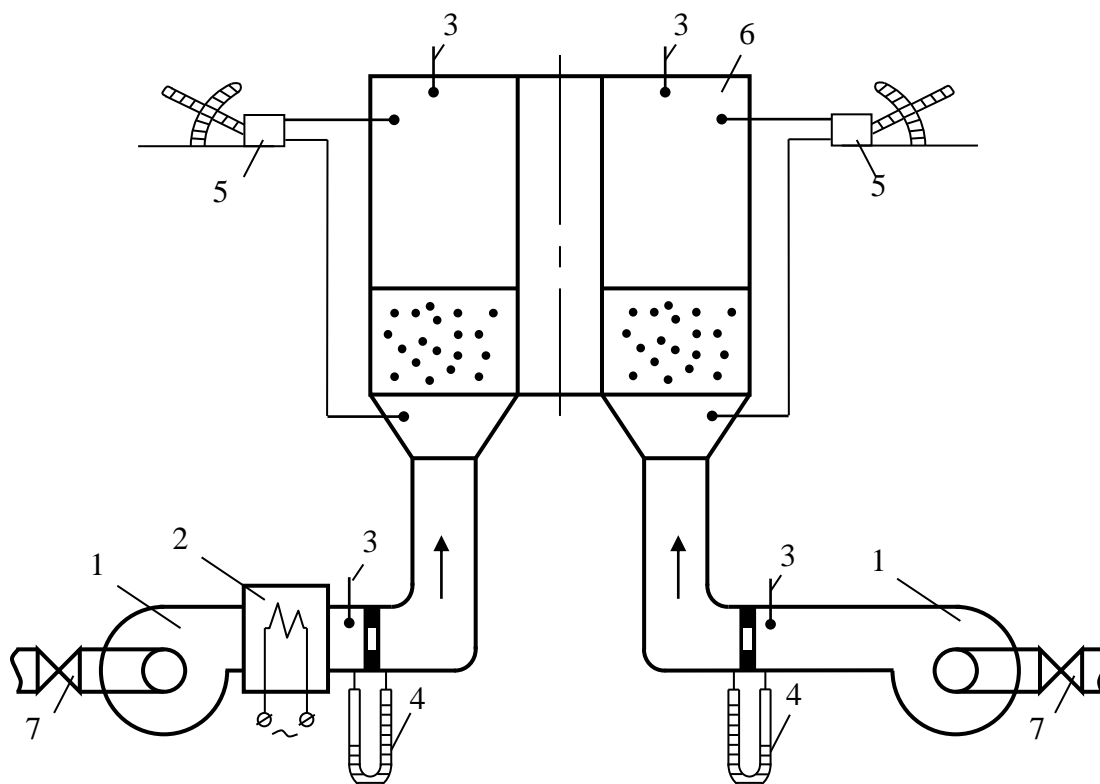


Рис. 1.1. Схема лабораторной установки:
 1 – вентилятор; 2 – электрокалорифер; 3 – термопары;
 4 – измеритель скорости газа; 5 – дифференциальный микроманометр;
 6 – теплообменный аппарат; 7 – заслонка

Порядок проведения эксперимента

Эксперименты следует проводить в следующей последовательности:

1. Проверить правильность подключения измерительных приборов, наличие рабочей жидкости в приборах для измерения расхода и давления теплоносителей, а также наличие промежуточного дисперсного теплоносителя в аппарате.
 2. Включить вентиляторы.
 3. Включить электрокалорифер, установить требуемое напряжение на нагревательных элементах.
 4. Выждать 15-20 минут для выхода лабораторной установки на стационарный режим.
 5. Измерить температуру воздуха t'_2 , t''_2 , t'_x , t''_x на входе и выходе в «горячую» и «холодную» камеры.
 6. Измерить перепад давления H_1 и H_2 измерителей скорости горячего и холодного воздуха – дифференциальных микроманометров 4 (рис. 1.1).
 7. Измерить потери давления H_3 и H_4 в «горячей» и «холодной» камерах аппарата – дифференциальных микроманометров 5 (рис. 1.1).
 8. Эксперименты выполняются для трёх режимов работы теплообменного аппарата.
- Результаты измерений сводятся в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений

№ опыта	H_1 , мм	H_2 , мм	H_3 , мм	H_4 , мм	t'_2 , °С	t''_2 , °С	t'_x , °С	t''_x , °С
1								
2								
3								

Обработка результатов экспериментов

1. Показания дифференциальных манометров из размерности «мм» («дел.») необходимо перевести в размерность «Па» по формуле

$$\Delta P = k \cdot \rho_{cn} \cdot g \cdot H, \quad (1.8)$$

где ρ_{cn} – плотность рабочего вещества микроманометра (технический спирт), кг/м³;

k – параметр, характеризующий угол наклона трубки микроманометра;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

2. Плотность горячего и холодного воздуха перед теплообменным аппаратом ρ_g , кг/м^3 определяется по формуле

$$\rho_g = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (1.9)$$

где P – давление воздуха, Па. Оно принимается равным атмосферному;

$R = 287$ – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг К).

T – абсолютная температура воздуха перед входом в «горячую» и «холодную» камеры аппарата, К.

3. Определяется скорость горячего и холодного воздуха v_g , м/с по формуле

$$v_g = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_g}}, \quad (1.10)$$

где ΔP – перепад давления, зафиксированный измерителями скорости горячего и холодного воздуха, Па.

4. Определяется расход горячего и холодного воздуха G_g , кг/с по формуле

$$G_g = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v_g \cdot \rho_g, \quad (1.11)$$

где d – диаметр воздуховодов, м. Диаметр воздуховодов в лабораторной установке равен 0,1 м.

5. Определяется тепловой поток в холодной камере Q_x , Вт по формуле (1.4).

6. Экономия топлива за счёт использования ВЭР B_1 , кг у.т. определяется по формуле

$$B_1 = \frac{Q_x}{r} \cdot t, \quad (1.12)$$

где $r = 29330$ – теплотворная способность (теплота сгорания) условного топлива, кДж/кг;

t – время работы теплообменного аппарата за год, с.

7. Суммарная мощность приводов вентиляторов N , Вт определяется по формуле

$$N = \frac{\frac{G_{вз} \cdot \Delta P_3}{\rho_{вз}} + \frac{G_{вх} \cdot \Delta P_4}{\rho_{вх}}}{\eta_{цв}}, \quad (1.13)$$

где $\eta_{цв} = 0,6$ – КПД центробежного вентилятора.

8. Расход топлива на тепловой электростанции, необходимый для привода центробежных вентиляторов B_2 , кг у.т. определяется по формуле

$$B_2 = \frac{N \cdot t}{r \cdot \eta_{тэс}}, \quad (1.14)$$

где $\eta_{тэс} = 0,35$ – КПД тепловой электростанции.

9. Общая экономия топлива ΔB , кг у.т. определяется по формуле

$$\Delta B = B_1 - B_2. \quad (1.15)$$

Результаты вычислений сводятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты вычислений

№ опыта	ΔP_1 , Па	ΔP_2 , Па	ΔP_3 , Па	ΔP_4 , Па	$\rho_{вз}$, кг/м ³	$\rho_{вх}$, кг/м ³	$v_{вз}$, м/с	$v_{вх}$, м/с
1								
2								
3								
№ опыта	$G_{вз}$, кг/с	$G_{вх}$, кг/с	Q_x , кВт	N , Вт	B_1 , кг у.т.	B_2 , кг у.т.	ΔB , кг у.т.	
1								
2								
3								

По результатам вычислений строится график зависимости общей экономии топлива от начальной температуры горячего воздуха $\Delta B = f(t'_2)$, из которого определяется температура воздуха, при которой общая экономия топлива минимальна.

Контрольные вопросы

1. Что такое псевдооживленный слой?
2. Какими достоинствами обладает псевдооживленный слой?
3. Какие теплоносители применяются в представленном теплообменном аппарате?
4. Какие достоинства и недостатки присущи изученной конструкции регенеративного теплообменного аппарата?
5. Охарактеризуйте построенный график.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ П-ОБРАЗНОГО КОМПЕНСАТОРА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Цель работы: изучение режимов работы П - образного компенсатора температурных деформаций трубопроводов, методики расчёта механических напряжений в компенсаторе и его основных геометрических характеристик.

Основные теоретические сведения

Компенсация температурных деформаций имеет исключительно важное значение для нормальной работы тепловых сетей. Если в трубопроводе отсутствует компенсация температурных деформаций, то при сильном нагревании в стенке трубопровода могут возникнуть большие напряжения. Величина этих напряжений σ , Па определяется по формуле:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (t - t_n), \quad (2.1)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К;

E – модуль упругости материала трубы, Па;

t , t_n – температура трубопровода в рабочем состоянии и в момент монтажа, соответственно, °С.

Как видно из формулы (2.1), возникающие напряжение не зависят от геометрических характеристик трубопроводов, а зависят только от свойств стали и разности температур.

Способы компенсации температурных удлинений, применяемые в тепловых сетях, весьма разнообразны. Все компенсаторы делятся на осевые и радиальные. К осевым компенсаторам относятся сальниковые, линзовые и манжетные, к радиальным – шарнирные, П-, S- и Ω -образные компенсаторы а также естественная компенсация.

Наиболее распространёнными в тепловых сетях являются П-образные компенсаторы. К их достоинствам относятся простота устройства, надёжность, отсутствие необходимости в надзоре и уходе, разгруженность неподвижных опор от усилий внутреннего давления. Недостатками таких компенсаторов являются поперечные перемещения деформируемых участков трубопровода, повышенное гидравлическое сопротивление, сравнительно большие габариты.

Расчётная методика П-образного компенсатора базируется на теории изгиба криволинейного бруса.

Описание конструкции экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рисунок 2.1) состоит из следующих элементов:

- П-образного компенсатора 1, изготовленного из латуни;
- неподвижных опор 2, обеспечивающие удержание трубопровода и не позволяющие ему перемещаться при тепловых линейных перемещениях и возникающих крутящих моментах в любом направлении;
- трёх индикаторов I_1 , I_2 , I_3 для измерения линейных перемещений компенсатора;
- термостата 3, предназначенного для поддержания постоянной заданной температуры;
- насоса 4.

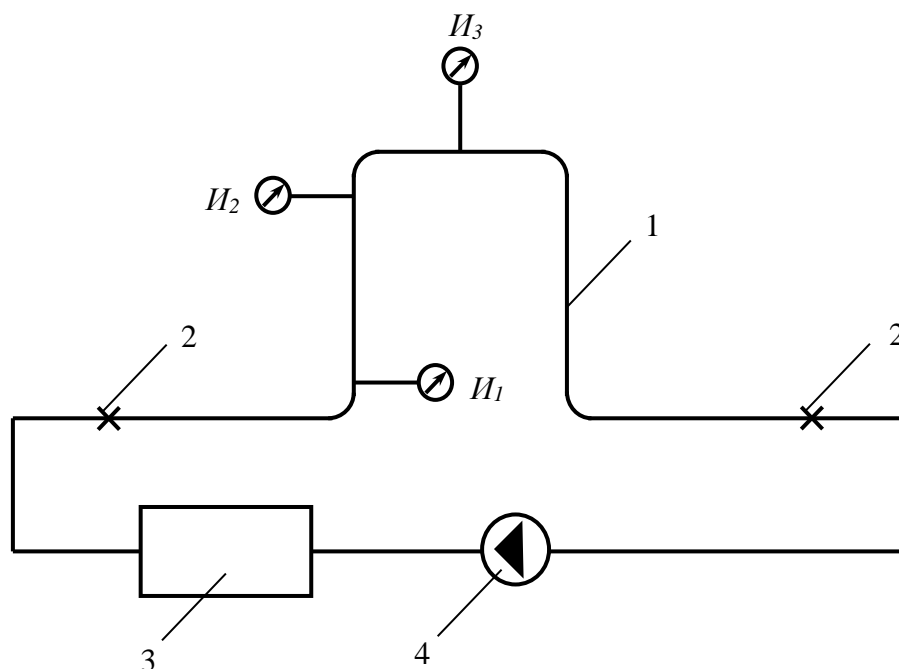


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:
1 – компенсатор; 2 – неподвижная опора; 3 – термостат;
4 – насос; I_1 , I_2 , I_3 – индикаторы

Температура воды, проходящей через компенсатор, задаётся электроконтактным термометром термостата, перемещения компенсатора определяются по показаниям индикаторов I_1 , I_2 и I_3 .

Перед началом экспериментов измеряется расстояние между неподвижными опорами L , средний радиус кривизны колен компенсатора R , длина вылета компенсатора H , геометрические размеры l_1 , l_2 , l_3 , наружный диаметр трубы d_n , а также снимаются показания индикаторов I_1 , I_2 , I_3 (рисунок 2.2).

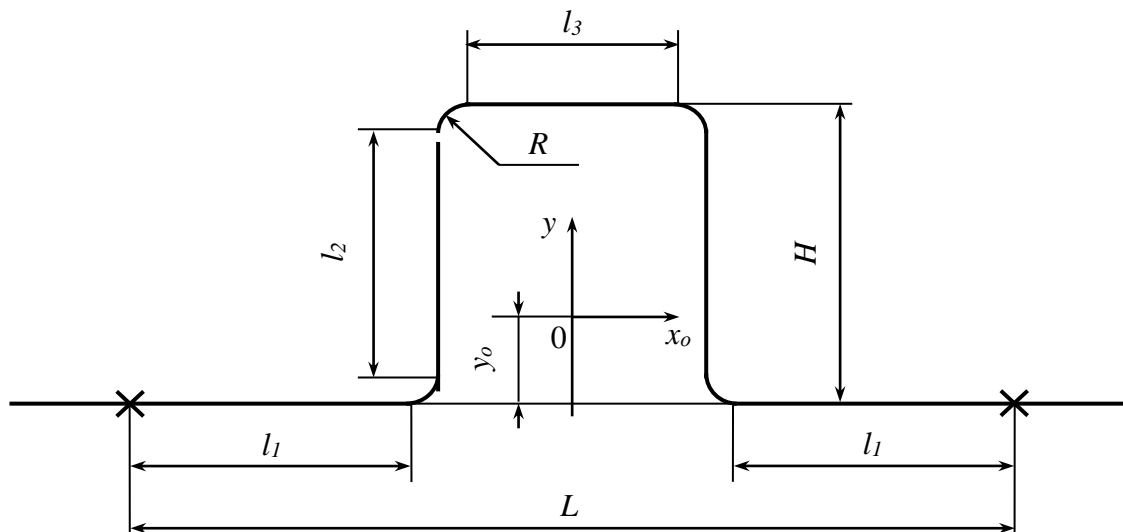


Рис. 2.2. Линейные размеры компенсатора

Порядок проведения эксперимента

Эксперименты следует проводить в следующей последовательности:

1. Проверить правильность присоединения элементов установки и наличие воды в термостате.
2. Электроконтактным термометром установить требуемую температуру теплоносителя (воды).
3. Выждать 15-20 минут для выхода лабораторной установки на стационарный режим.

Признаком стационарного режима является стабилизация показаний индикаторов.

4. Снимаются показания индикаторов I_1 , I_2 , I_3 .

Эксперименты выполняются для трёх режимов при разных температурах теплоносителя.

Результаты измерений сводятся в табл. 2.1.

Результаты измерений

№ опыта	t , °C	t_n , °C	I_1 , МКМ	I_2 , МКМ	I_3 , МКМ
1					
2					
3					

Обработка результатов эксперимента

1. Вычисляется приведённая длина осевой линии L_{np} , м по формуле

$$L_{np} = 2 \cdot l'_1 + 2 \cdot l'_2 + l'_3 + 2\pi \cdot R, \quad (2.2)$$

где l'_1 , l'_2 , l'_3 – длины участков с учётом температурного удлинения, м. Эти величины вычисляются по формуле

$$l'_i = l_i + I_i,$$

где l_i , I_i – длина участка и показания соответствующего индикатора, м.

2. Геометрическая характеристика гибкости трубы h вычисляется по формуле

$$h = \frac{\delta \cdot R}{r_{cp}^2}, \quad (2.3)$$

где δ – толщина стенки трубы, м. Толщина стенки латунной трубки составляет 0,7 мм;

r_{cp} – средний радиус трубы, м.

3. Вычисляется коэффициент жёсткости гибких отводов k по формулам:

$$k = \frac{1,65}{h}, \text{ если } h \leq 1; \quad (2.4)$$

$$k = \frac{1 + 12 \cdot h^2}{10 + 12 \cdot h^2}, \text{ если } h > 1. \quad (2.5)$$

4. Вычисляются координаты упругого центра тяжести y_o , м по формуле

$$y_o = \frac{(l'_2 + 2 \cdot R) \cdot (l'_2 + l'_3 + \pi \cdot R \cdot k)}{L_{np}}. \quad (2.6)$$

5. Вычисляется центральный момент инерции относительно оси x I_o , м^3 по формуле

$$I_o = 0,167 \cdot (l'_2)^3 + (2 \cdot l'_2 + 4 \cdot l'_3) \cdot (0,5 \cdot l'_2 + R)^2 + \\ + 6,28 \cdot R \cdot k \cdot (0,5 \cdot (l'_2)^2 + 1,635 \cdot l'_2 \cdot R + 1,5 \cdot R^2) - L_{np} \cdot y_o^2. \quad (2.7)$$

6. Вычисляется момент инерции сечения трубы I , м^4 по формуле

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d_n^4 - d_g^4). \quad (2.8)$$

7. Момент сопротивления изгибу W , м^3 вычисляется по формуле

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot d_n^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_g}{d_n} \right)^4 \right]. \quad (2.9)$$

8. Коэффициент концентрации напряжений m вычисляется по формуле

$$m = \frac{0,9}{h^{0,66}}. \quad (2.10)$$

9. Вычисляется расчётное тепловое удлинение Δ , м по формуле

$$\Delta = \alpha \cdot L \cdot (t - t_n). \quad (2.11)$$

10. Вычисляется сила упругой деформации P , Н по формуле

$$P = \frac{\Delta \cdot E \cdot I}{I_o}. \quad (2.12)$$

11. Вычисляются изгибающие напряжения σ , Па :
- на спинке компенсатора

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot (H - y_o) \cdot m}{W}; \quad (2.13)$$

- на участках, прилегающих к компенсатору, на отводе

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot y_o \cdot m}{W}; \quad (2.14)$$

- на прямых участках, прилегающих к компенсатору

$$\sigma_3 = \frac{P \cdot y_o}{W}. \quad (2.15)$$

Результаты вычислений сводятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты вычислений

№ опыта	L_{np} , м	h	k	y_o , м	I_o , м ³	W , м ³
1						
2						
3						
№ опыта	t	Δ , м	P , Н	σ_1 , Па	σ_2 , Па	σ_3 , Па
1						
2						
3						

По результатам вычислений строятся графики зависимости напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 от температуры, теплоносителя t , а также эскиз деформаций компенсатора, на котором компенсатор изображается в масштабе 1:1, а перемещения – в масштабе 20:1.

Контрольные вопросы

1. Какие виды гибких компенсаторов температурных деформаций вам известны?
2. Перечислите достоинства и недостатки П-образных компенсаторов.
3. От чего зависят температурные напряжения теплопроводов?
4. В какой части П-образного компенсатора изгибающие напряжения достигают максимальных и минимальных значений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОДОСТРУЙНОГО ЭЛЕВАТОРА

Цель работы: изучение конструкции и режимов работы водоструйного элеватора, методики расчёта и выбора стандартных элеваторов.

Основные теоретические сведения

Элеваторы (водоструйные насосы) используются для подмешивания сетевой воды из обратной магистрали в основной поток с целью снижения температуры сетевой вода перед отопительными приборами.

Рабочий поток (рисунок 3.1), проходя через сопло 1, ускоряется, а его статическое давление уменьшается до давления, несколько меньшего, чем в обратной магистрали. Вода из обратной магистрали подсасывается в приёмную камеру 2. В камере смешения 3 рабочий и инжектированный потоки перемешиваются, а затем тормозятся в диффузоре 4. Уменьшение скорости потока в диффузоре сопровождается увеличением статического давления.

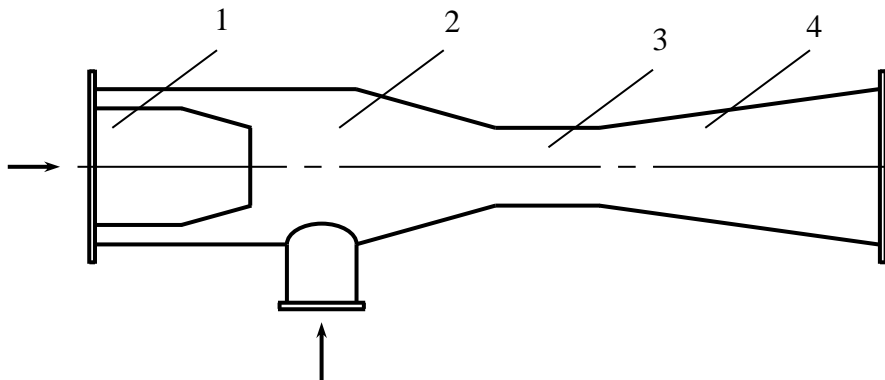


Рис. 3.1. Водоструйный элеватор:

1 – сопло; 2 – приёмная камера; 3 – камера смешения;
4 – диффузор

Если геометрические размеры элеватора и гидравлическое сопротивление местной системы известны, то можно рассчитать коэффициент инжекции u , т.е. отношение расхода инжектируемой воды к расходу рабочего потока:

$$u = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (3.1)$$

где a , b , c – коэффициенты скорости камеры смешения, диффузора, входного участка камеры смешения.

Данные коэффициенты определяются по формулам:

$$b = 2 \cdot \left(2 - \varphi_3^2 + \frac{2 \cdot S_c \cdot f_3^2}{\rho_e} \right); \quad (3.2)$$

$$a = \frac{b}{2} - \frac{(2 \cdot \varphi_2 - \varphi_4^{-2}) \cdot f_3}{f_{н2}}; \quad (3.3)$$

$$c = - \left(\frac{2 \cdot \varphi_3 \cdot f_3}{f_{p1}} - \frac{b}{2} \right), \quad (3.4)$$

где S_c – гидравлическое сопротивление местной системы (отопления), (Па·с²)/м⁶;

f_{p1} , f_3 – площади выходного сечения сопла и сечения камеры смешения, м²;

$f_{н2} = f_3 - f_p$ – площадь сечения инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения, м²;

ρ_e – плотность воды, кг/м³;

$\varphi_2 = 0,975$ – коэффициент скорости камеры смешения;

$\varphi_3 = 0,9$ – коэффициент скорости диффузора;

$\varphi_4 = 0,925$ – коэффициент скорости входного участка камеры смешения.

Характеристика водоструйного элеватора имеет вид:

$$\frac{\Delta P_c^m}{\Delta P} = \varphi_1^2 \cdot \frac{f_{p1}}{f_3} \cdot \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \cdot \frac{f_{p1}}{f_{н2}} \cdot u^2 - (2 - \varphi_3^2) \cdot \frac{f_{p1}}{f_3} \cdot (1 + u)^2 \right], \quad (3.5)$$

где ΔP_c^m – теоретическое значение перепада давления в местной системе, Па;

ΔP – располагаемый перепад давления на элеваторе, Па;

$\varphi = 0,95$ – коэффициент скорости сопла.

Описание конструкции экспериментальной установки

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования элеватора, представлена на рисунке 3.2.

Диафрагма 5 служит для измерения расхода теплоносителя методом переменного перепада давления.

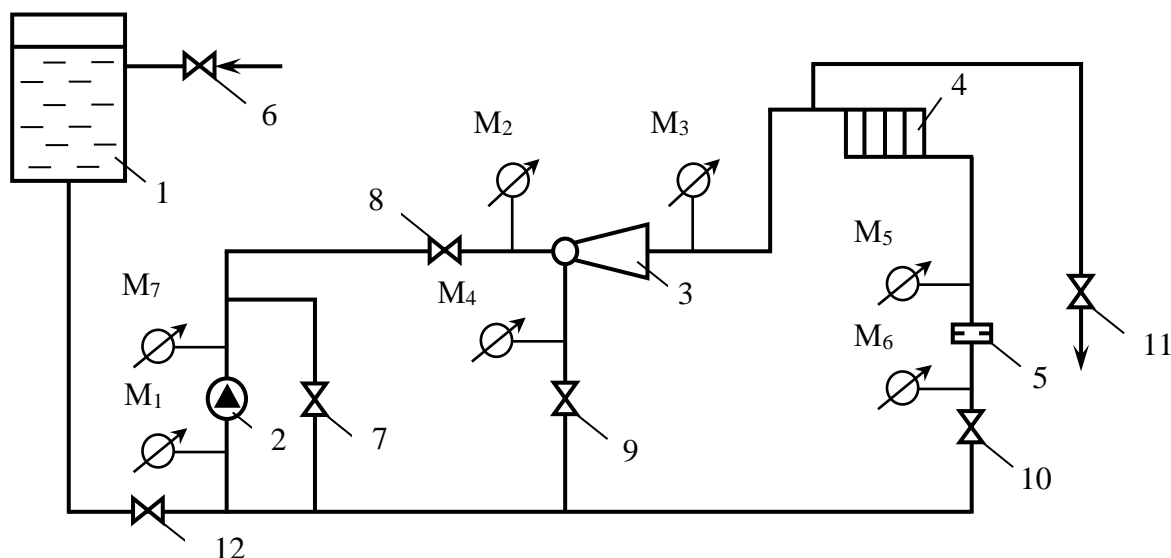


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки:
 1 – напорный бак; 2 – насос; 3 – элеватор; 4 – отопительный прибор;
 5 – диафрагма; 6-11 – вентили; M_1 – M_7 – манометры

Вентили 6 и 11 служат для заливки водой местной системы и удаления воздуха, вентили 8 и 10 – для изменения располагаемого напора и сопротивления местной системы. Расход воды через отопительный прибор определяется по показаниям манометров M_5 и M_6 .

Напорный бак (гидроаккумулятор) 6 предназначен для поддержания рабочего напора воды в системе.

Порядок проведения эксперимента

Эксперименты следует проводить в следующей последовательности.

1. Заполнить установку (местную систему) водой, для чего открыть все вентили и дождаться появления воды в дренажном патрубке, после чего закрыть вентили 6 и 11.

2. Перекрыть вентиль 7.

3. В таблицу результатов измерений (табл. 3.1) записать показания манометров при отсутствии циркуляции воды в системе.

4. Включить насос.

5. Выполнить измерения давления для шести режимов:

- в первых трёх вентиль 10 должен быть полностью открыт, а вентилем 8 регулируется располагаемый перепад давлений элеватора;

- в последующих трёх вентиль 8 должен быть полностью открыт, а вентилем 10 регулируется гидравлическое сопротивление местной системы.

6. После окончания опытов выключить насос и слить воду из системы.

Результаты измерений записываются в таблицу 3.1.

Результаты измерений

№ опыта	M_1 , кгс/см ²	M_2 , кгс/см ²	M_3 , кгс/см ²	M_4 , кгс/см ²	M_5 , кгс/см ²	M_6 , кгс/см ²	M_7 , кгс/см ²
Нет циркуляции							
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Обработка результатов эксперимента

Расчёт производится для шести режимов работы элеватора.

1. Определяются потери в местной системе Δp_c^3 , кгс/см² (Па) по формуле

$$\Delta p_c^3 = M_3 - M_4 - (M_{30} - M_{40}). \quad (3.6)$$

2. Определяется перепад давления на диафрагме $\Delta p_{ш}$ кгс/см² (Па):

$$\Delta p_{ш} = M_5 - M_6 - (M_{50} - M_{60}). \quad (3.7)$$

3. По графику, представленному на рисунке 3.3, определяется расход воды через отопительный прибор V , м³/с.

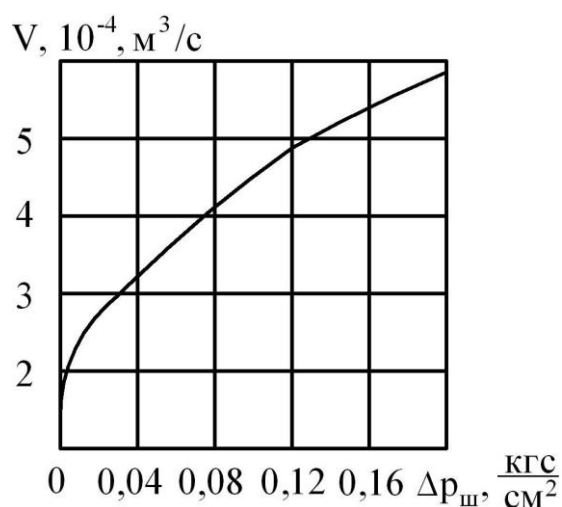


Рис. 3.3. Зависимость расхода воды от перепада давлений на диафрагме

4. Определяется гидравлическое сопротивление местной системы S_c^3 , $(\text{Па}\cdot\text{с}^2)/\text{м}^6$ по формуле

$$S_c^3 = \Delta p_c^3 / V^2. \quad (3.8)$$

5. По формуле (3.1) рассчитывается коэффициент инжекции элеватора u . На экспериментальном стенде установлен элеватор № 2, имеющий диаметр камеры смешения $d_3 = 20$ мм и диаметр выходного сечения сопла $d_{p1} = 4,5$ мм.

6. Определяется располагаемый перепад давлений на элеваторе Δp , кгс/см² (Па) по формуле

$$\Delta p = M_2 - M_4 - (M_{20} - M_{40}). \quad (3.9)$$

7. По формуле (3.5) рассчитывается теоретическое значение перепада давления Δp_c^m , Па.

8. Определяется относительная погрешность δp , % определения теоретического перепада давления по формуле

$$\delta p = \frac{(\Delta p_c^m - \Delta p_c^3)}{\Delta p_c^m} \cdot 100. \quad (3.10)$$

Результаты вычислений сводятся в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Результаты вычислений

№ опыта	Δp_u , Па	$V, 10^{-4}$, м ³ /с	Δp_c^3 , Па	$S_c^3, 10^{10}$, $(\text{Па}\cdot\text{с}^2)/\text{м}^6$	u	Δp , Па	Δp_c^m , Па	δp , %
1								
2								
3								
4								
5								
6								

По результатам вычислений строится график зависимости коэффициента инжекции u от расхода воды V .

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение элеватора.
2. Каким образом работает элеватор?
3. Из каких соображений определяется величина коэффициента инжекции?
4. Дайте определение коэффициента инжекции.
5. Назовите элементы экспериментальной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Цель работы: опытным путём определить закон изменения сопротивления тепловой сети и расхода теплоносителя от степени открытия регулирующих устройств.

Основные теоретические сведения

Тепловая нагрузка абонентов изменяется в зависимости от метеоусловий, режима расхода теплоносителя (воды), режима работы технологического оборудования и т.д. Задачей регулирования является поддержание в отапливаемых помещениях расчётной внутренней температуры.

В зависимости от пункта осуществления регулирования тепловой нагрузки различают центральное, групповое, местное и индивидуальное регулирование. В большинстве случаев оно ограничивается двумя ступенями: центральным и групповым или местным.

Для определения зависимости расхода теплоносителя от степени открытия регулирующего устройства рассмотрим схему движения теплоносителя через абонентскую установку А (рисунок 4.1).

Расход теплоносителя при полностью открытом клапане V' , м³/с вычисляется по формуле

$$V' = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{S_a + S'_k}}, \quad (4.1)$$

где S_a – сопротивление абонентской установки, (м·с²)/м⁶;

S'_k – сопротивление регулирующего клапана в полностью открытом положении, (м·с²)/м⁶.

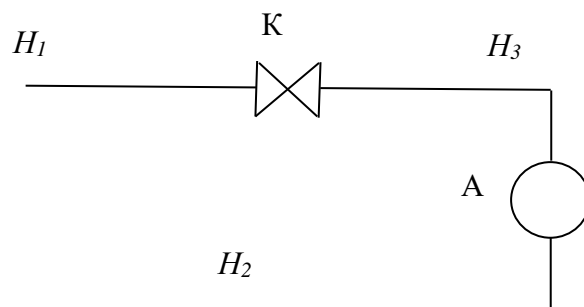


Рис. 4.1. Схема движения теплоносителя:

К – регулирующий клапан; H_1 – напор перед регулирующим клапаном;
 H_2 – напор после абонентской установки; H_3 – напор после
регулирующего клапана; А – абонентская установка

При произвольном положении клапана расход V , м³/с составит:

$$V = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{S_a + S_k}}, \quad (4.2)$$

где S_k – сопротивление клапана в произвольном положении, (Па·с²)/м⁶.

С учётом выражений (4.1) и (4.2) можно найти степень применения расхода воды при частичном закрытии регулирующего клапана \bar{V} :

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{\frac{S_a}{S'_k} + 1}{\frac{S_a}{S'_k} + \frac{S_k}{S'_k}}}, \quad (4.3)$$

где $\bar{V} = V / V'$.

Из выражения (4.3) следует, что изменение расхода теплоносителя при местном регулировании зависит как от отношения S_a / S'_k , так и от характера изменения сопротивления регулирующего органа от хода штока, т.е. от отношения S_k / S'_k .

Измерительным элементом расходомера является дроссельная шайба (диафрагма). В качестве регулирующих устройств в стенде установлены: вентиль $d_u = 25$ мм, игольчатый вентиль $d_u = 45$ мм, задвижка $d_u = 80$ мм. Вентили 7-12 предназначены для обеспечения возможности автономного испытания каждого из перечисленных регулирующих устройств. Потери напора как в сети в целом так и на отдельных её участках определяются по показаниям манометров 17-22.

Описание конструкции лабораторного стенда

Лабораторный стенд, схема которого представлена на рисунке 4.2, состоит из напорного бака 1, циркуляционного насоса 2, расходомера переменного перепада давления 3, регулирующих устройств 4, 5, 6, а также запорных вентилей 7-16 и пружинных манометров 17-25.

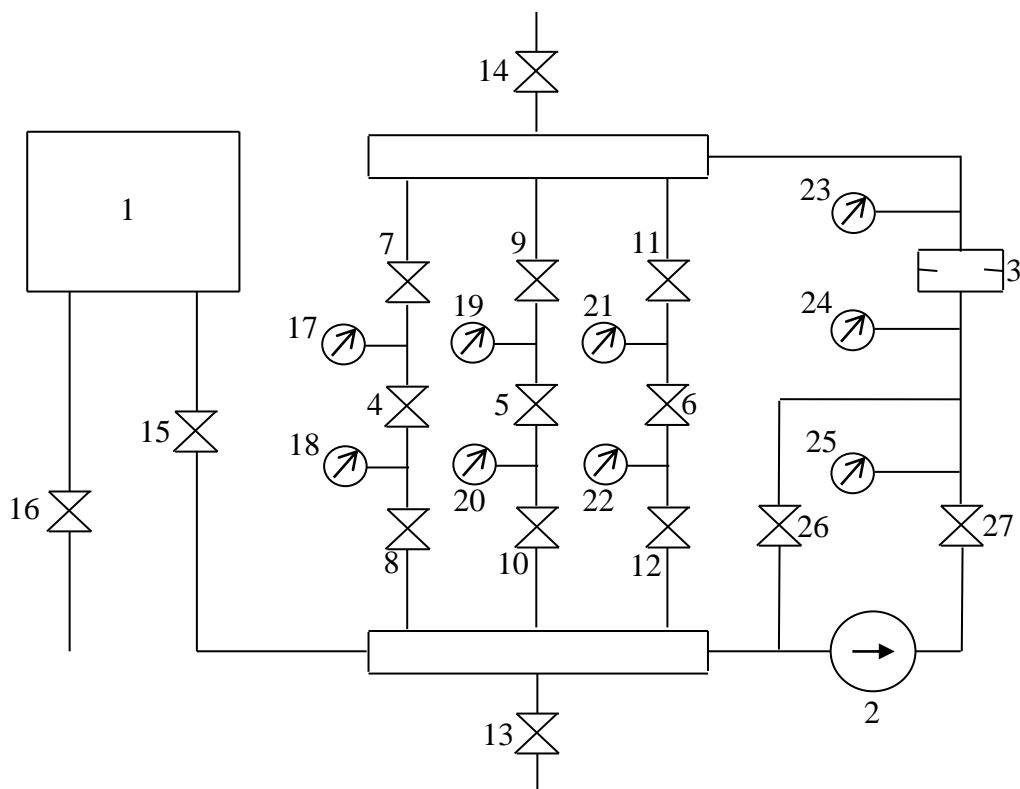


Рис. 4.2 – Схема экспериментальной установки:
1 – напорный бак; 2 – насос; 3 – расходомер;
4-6 – регулирующие устройства; 7-16, 26-27 – запорные вентили;
17-25 – пружинные манометры

Порядок проведения эксперимента

Работа проводится в следующей последовательности.

1. Заполнить трубопроводы лабораторного стенда водой, для чего открыть все вентили и дождаться появления воды в дренажном патрубке. После этого закрыть вентили 2, 14 и 16.

2. Определить число оборотов штока n от положения «открыто» до положения «закрыто» для элементов сети 4, 5 и 6.

3. Закрыть все вентили на двух из трёх ветвей сети, на оставшейся ветви все вентили должны быть открытыми.

4. Включить циркуляционный насос.

5. При полностью открытом испытуемом венти́ле или задви́жке (4, 5 или 6) провести замеры давлений по манометрам с целью определения сопротивления сети и её элементов, а также расхода воды.

6. Постепенно закрывать испытуемый регулирующий орган, фиксируя при этом соответствующее число оборотов штока X , произвести замеры по п. 5. Рекомендуется провести измерения в 6-10 положениях штока, включая полностью закрытое состояние.

Опыт повторить в обратном порядке, т.е. от положения «закрыто» до положения «открыто».

Результаты измерений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений
(труба № ____, диаметр $d =$ __ мм; $n =$ __)

№ опыта	X	$P_{квх}$, кгс/см ²	$P_{квых}$, кгс/см ²	$P_{швх}$, кгс/см ²	$P_{швых}$, кгс/см ²	$P_{нвх}$, кгс/см ²	$P_{нвых}$, кгс/см ²
1							
2							
3							

7. В аналогичной последовательности провести испытания других ветвей сети.

После окончания работы слить воду из системы.

Обработка результатов эксперимента

1. Определяется степень открытия испытываемого устройства η_x при различных положениях штока по формуле

$$\eta_x = \frac{X}{n}. \quad (4.4)$$

2. Определяются потери давления в исследуемом клапане, в расходомере, а также потери давления всей сети Δp , кгс/см² (Па) по формулам

$$\Delta p_k = p_{квх} - p_{квых}; \quad (4.5)$$

$$\Delta p_{ш} = p_{швх} - p_{швых}; \quad (4.6)$$

$$\Delta p_c = p_{нвых} - p_{нвх}. \quad (4.7)$$

3. С помощью тарифовочного графика, представленного на рис. 3.3, по величине $\Delta p_{и}$ определяется объёмный расход воды V , м³/с.

4. Определяется коэффициент местных гидравлических потерь в регулирующем органе. Полагая режим течения воды турбулентным, величина ξ может быть получена из формулы

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot w^2}{2}, \quad (4.8)$$

где w – скорость движения воды в сечении перед местным сопротивлением, м/с;

ρ_g – плотность воды кг/м³.

Выразив скорость w через объёмный расход V , коэффициент гидравлических потерь ξ_k , находим из (4.8):

$$\xi_k = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot \Delta p_k}{8 \cdot \rho_g \cdot V^2}. \quad (4.9)$$

Для того, чтобы убедиться в корректности применения формулы (4.8), необходимо определить режим движения жидкости, для чего вычислить критерий Re .

5. Определяется гидравлическое сопротивление регулирующего органа S_k , (м·с²)/м⁶ и всей системы S_c , (м·с²)/м⁶. Учитывая, что $H = \Delta p / (\rho_g \cdot g)$ и $S = H/V^2$ гидравлическое сопротивление вычисляется по формуле

$$S_i = \frac{\Delta p_i}{\rho_g \cdot g \cdot V_i^2}. \quad (4.10)$$

6. Гидравлическое сопротивление всей системы определяется как сумма сопротивлений регулирующего клапана и абонентской установки:

$$S_c = S_k + S_a. \quad (4.11)$$

С помощью формулы (4.11) определяется гидравлическое сопротивление абонентской установки S_a , (м·с²)/м⁶.

6. По формуле (4.3) определяется степень изменения расхода воды при различных положениях регулирующего клапана.

Результаты вычислений заносятся в табл. 4.2.

Результаты вычислений
(труба № ____, диаметр $d =$ __ мм; $n =$ __)

№ опыта	η_x	Δp_k , Па	$\Delta p_{ш}$, Па	Δp_c , Па	ξ_{κ}
1					
2					
3					
№ опыта	$V, 10^{-4}$, м ³ /с	S_{κ} , (м·с ²)/м ⁶	S_c , (м·с ²)/м ⁶	S_a , (м·с ²)/м ⁶	\bar{V}
1					
2					
3					

7. По полученным результатам построить графики зависимостей $\xi_{\kappa} = f(\eta_x)$; $S_{\kappa} = f(\eta_x)$; $\bar{V} = f(\eta_x)$.

Контрольные вопросы

1. Что является основной задачей регулирования тепловой нагрузки?
2. Перечислите режимы регулирования тепловой нагрузки, охарактеризуйте эти режимы.
3. Дайте краткие характеристики методам центрального регулирования отопительной нагрузки.
4. Как определяется гидравлический режим тепловой сети, питаемой центробежным насосом?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет элементов систем централизованного теплоснабжения: учеб. пособие/ А.М. Наумов, А.В. Санников, В.Ю. Дубанин, Ю.Н. Агапов. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 117 с.
2. Проектирования централизованной системы теплоснабжения: учеб. пособие/ А.М. Наумов, А.В. Санников, В.Ю. Дубанин, Ю.Н. Агапов. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 112 с.
3. Гельперин Н.И. Основы техники псевдоожижения / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., стереот. – М: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
5. Теплоснабжение / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков, И.Б. Прони-на, В.А. Слемзин. – М: Высшая школа, 1980. – 408 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Меры безопасности при выполнении лабораторных работ.....	4
Лабораторная работа № 1. Исследование регенеративного теплообменного аппарата с псевдооживленным слоем промежуточного теплоносителя для утилизации газообразных ВЭР.....	5
Лабораторная работа № 2. Исследование П-образного компенсатора температурных деформаций.....	11
Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы водоструйного элеватора.....	17
Лабораторная работа № 4. Изучение гидравлических характеристик регулирующих органов тепловых сетей.....	22
Библиографический список.....	28

ИСТОЧНИКИ И СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов направления 13.03.01
«Теплоэнергетика и теплотехника»
(профиль «Промышленная теплоэнергетика»)

Составители:

Наумов Александр Михайлович
Надеев Александр Александрович

В авторской редакции

Подписано в печать 01.03.2021.
Формат 60×84 1/16. Усл. изд. л. 1,6.
Тираж 60 экз. Зак. №

ГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14