

Учебно-научно-производственное предприятие
«ТЕПЛОЭНЕРГЕТИК»

Утверждаю:

Директор

Бродов Ю.М.

«

»

2020г.



ОТЧЕТ

Испытания подогревателей Гурзуфской котельной

(отчет по договору № 7S00-FA051/02-014/0195-2020 от 18.05.2020)

Руководитель работы
зам. директора

A blue ink signature of K.Э. Аронсон.

К.Э. Аронсон

Ответственные исполнители:
Магистрант

A blue ink signature of K.A. Симбирцев.

К.А. Симбирцев

Магистрант

A blue ink signature of A. Л. Демидов.

А. Л. Демидов

Ведущий сотрудник

A blue ink signature of N.B. Желонкин.

Н.В. Желонкин

Екатеринбург, 2020

Оглавление

Введение	3
1. Описание объекта.....	4
1.1. Схема установки подогрева воды Гурзуфской котельной	4
1.2. Серийные теплообменники (ПТВ).....	5
1.3. Тонкостенный теплообменный аппарат (ТТАИ).....	6
2. Схема измерений	8
3. Методика обработки результатов испытаний	9
3.1. Расчет нормативного коэффициента теплопередачи	9
3.2. Расчет фактических термодинамических показателей секций подогревателей	11
3.3. Расчет гидравлических сопротивлений	12
4. Результаты испытаний.....	14
4.1. Тепловой и материальный баланс	15
4.2. Гидравлическое сопротивление ТТАИ.....	16
4.3. Тепловая эффективность подогревателей	18
Заключение.....	20
Приложения	23

Введение

В данном отчете представлены результаты второго этапа работы оценки показателей нового высокоэффективного теплообменного аппарата с трубками малого диаметра (ТТАИ), установленного в схеме подогрева водопроводной воды Гурзуфской котельной.

На первом этапе работы [1] проведены испытания водо-водяных кожухотрубных подогревателей первой ступени подогрева сетевой воды Гурзуфской котельной. Первая ступень подогрева включала в себя 4 подогревателя (ПТВ). Первый подогреватель состоит из трех секций, 2,3 и 4-тый из 5 секций. ТТАИ установлен вместо трехсекционного ПТВ-1. ТТАИ выполнен двухсекционным. Площадь поверхности теплообмена ПТВ-1 составляет 79 м^2 ; площадь поверхности теплообмена двухсекционного ТТАИ – 19 м^2 . На ТТАИ смонтирована схема измерений, позволяющая определять температуры воды на входе и выходе из аппарата; давление по нагреваемой (холодной) и греющей (горячей) воде. Разработанная методика испытаний позволила оценить гидравлическое сопротивление ТТАИ, тепловые балансы и показатели тепловой эффективности подогревателей. Установлено, что тепловая эффективность ТТАИ соответствует техническому заданию; ТТАИ выполняет функции замененного ПТВ-1, но поверхность теплообмена ТТАИ в 4 раза меньше, чем у заменного ПТВ-1, что определяет высокую тепловую эффективность ТТАИ. Однако, фактический коэффициент теплопередачи ПТВ-1 в 2 раза меньше расчетного значения, что связано, с загрязнением аппарата, в результате его длительной эксплуатации. При замене ПТВ на другие теплообменники, в частности на ТТАИ, необходимо предусматривать запас поверхности теплообмена с учетом возможного будущего снижения тепловой эффективности аппарата из-за его загрязнения. Расчетное гидравлическое сопротивление схемы ТТАИ по горячей воде на 40...45% выше сопротивления по холодной воде, что связано с выбором диаметров подводящих трубопроводов. Расчетное гидравлическое

сопротивление ТТАИ по горячей воде в 2,0...2,5 раза выше, чем сопротивление ПТВ; напротив, гидравлическое сопротивление ТТАИ по холодной воде в 2,0...2,5 раза ниже, чем у ПТВ.

Для оценки показателей загрязняемости ТТАИ (температура и характер загрязнений) необходимо проведение их повторных испытаний через 2-3 отопительных сезона.

1. Описание объекта

1.1. Схема установки подогрева воды Гурзуфской котельной

Гурзуфская котельная предназначена для теплоснабжения жилых и промышленных зданий с максимальной температурой нагрева теплоносителя до 125°C. Система теплоснабжения потребителей - открытая с зависимым присоединением потребителей к тепловым сетям. Источником технического водоснабжения котельной являются ЕМУП «Водоканал», подающий на котельную воду из общегородской водопроводной сети. Гурзуфская котельная имеет в своем составе четыре водогрейных котла типа ПТВМ-100 (с параметрами теплоносителя 1,6 МПа, 150°C) и водоподготовительную установку с расходом воды 800 т/ч.

Схема водоподготовки Гурзуфской котельной приведена в Приложении 1. Техническая вода поступает на 1 ступень подогревателей, которая состоит из 4-х теплообменников. Первый теплообменник включает в себя две секции, теплообменных аппаратов (ТТАИ) с тонкостенными трубками, включенных параллельно по горячей и холодной воде. Площадь поверхности теплообмена каждой секции - 9,5 м². Теплообменники (ПТВ) 2, 3 и 4 представляют собой горизонтальные 5-ти секционные кожухотрубные водоводяные подогреватели. Площадь поверхности теплообмена одной секции - 26,3 м². Подробное описание основных характеристик теплообменников приведены в разделе 1.2 и 1.3.

После первой ступени подогревателей вода подается на вторую ступень, которая состоит из 5 подогревателей (ПХВ) аналогичных ПТВ-2,3,4 первой

ступени. Далее вода поступает в деаэраторы, где освобождается от неконденсирующихся газов. После деаэрации подготовленная вода, направляется в водогрейные котлы (ПТВМ-100), откуда подается потребителям.

1.2. Серийные теплообменники (ПТВ)

Теплообменники ПТВ-2,3,4 первой ступени имеют по 5 секций каждый. Секция – кожухотрубчатый водо-водяной теплообменник с противоточным движением теплоносителей. Секции соединены друг с другом через «калачи». Общий вид теплообменника представлен на рисунке 1.1., характеристики секции приведены в таблице 1.1.

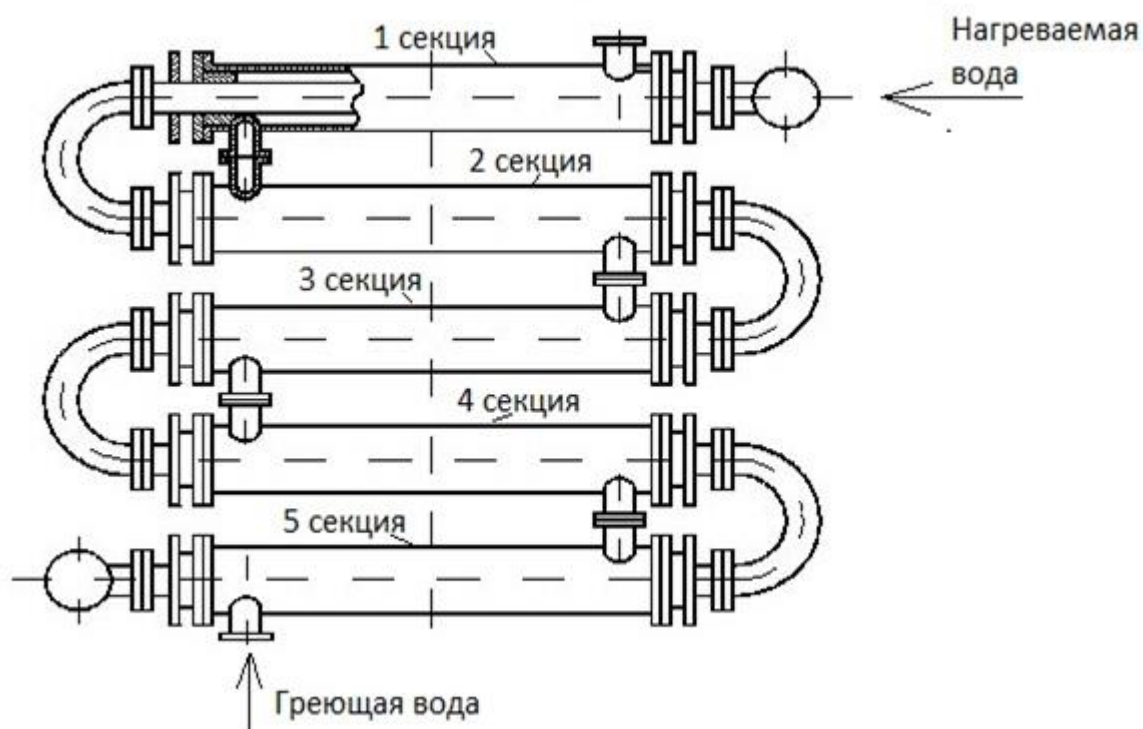


Рисунок 1.1. Общий вид ПТВ

Таблица 1.1 – Основные характеристики секции ПТВ

Наименование	Размерность	Обозначение	Значение
Наружный диаметр корпуса секции	м	D_n	0,325

Внутренний диаметр корпуса секции	м	$D_{\text{вн}}$	0,315
Толщина стенки корпуса секции	м	$\delta_{\text{сек}}$	0,005
Проходное сечение межтрубного пространства	м ²	$F_{\text{мтр}}$	0,0473
Диаметр трубки	м	$d_{\text{тр}}$	0,019
Толщина стенки трубки	м	$\delta_{\text{тр}}$	0,001
Внутренний диаметр трубки	м	$d_{\text{вн}}$	0,017
Материал стенки трубок	-	-	Нержавеющая сталь
Эквивалентный диаметр трубного пространства	м	$d_{\text{экв.тр}}$	0,017
Число трубок в секции	шт.	n	108
Проходное сечение трубного пространства	м ²	$F_{\text{тр}}$	0,0245
Длина секции	м	L	4,08
Площадь поверхности секции	м ²	$F_{\text{повер}}$	26,3

1.3. Тонкостенный теплообменный аппарат (ТТАИ)

Секция ТТАИ является кожухотрубным с высоко компактным нерегулярным трубным пучком теплообменным аппаратом, собранным из особо тонкостенных трубок. На трубки нанесена однозаходная винтообразная канавка, рисунок 1.2. В теплообменнике реализована противоточная схема движения теплоносителей. Основные характеристики теплообменника представлены в таблице 1.2, а схема подключения - на рисунке 1.3.

Таблица 1.2 – Основные характеристики секции ТТАИ

Наименование	Обозначение	Значение
Длина подогревателя, мм	$L_{\text{тр}}$	1095
Диаметр кожуха, мм	$D_{\text{к}}$	203
Количество трубок, шт.	$N_{\text{тр}}$	344
Диаметр трубки, мм	$D_{\text{тр}}$	8
Толщина стенки трубки, мм	$\delta_{\text{ст}}$	0,3
Шаг накатки, мм	s	4,2
Глубина канавки, мм	h	0,45
Материал стенки трубок	-	Нержавеющая сталь
Площадь поверхности теплообмена, м ²	$F_{\text{т}}$	9,5



Рисунок 1.2. Теплообменник ТТАИ (<https://www.c-o-k.ru/articles/teploobmennym-apparatam-ttai>)

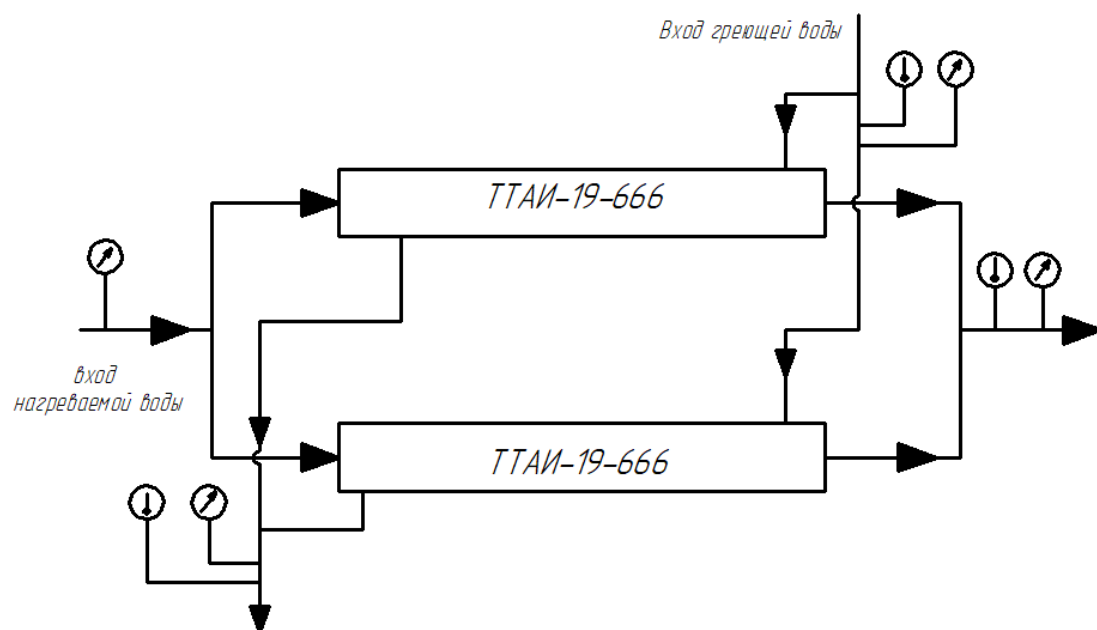




Рисунок 1.3 Схема подключения теплообменного аппарата ТТАИ: а. – схема измерений;
б. – теплообменный аппарат.

2. Схема измерений

Испытания подогревателей первой ступени схемы подготовки воды на Гурзуфской котельной проводились по программе, приведенной в Приложении 2. В процессе проведения испытаний для теплообменника ТТАИ для исключения случайной погрешности проводились несколько раз замеры следующих величин:

- температуры нагреваемой воды на входе и выходе из теплообменника измерялись термометрами с ценой деления $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- давление горячей и холодной воды на входе и выходе из теплообменника измерялось с помощью контрольных манометров с ценой деления $0,1\text{ кгс/см}^2$;

- расход горячей и холодной воды измерялся с помощью поверенного ультразвукового расходомера «Расходомер жидкости ультразвуковой (Portaflow)» 2014 г. выпуска.

На теплообменниках ПТВ-2,3,4 измерялись температуры горячей и холодной воды с помощью оптического пирометра, а также расходы горячей и холодной воды с помощью ультразвукового расходомера Portaflow.

3. Методика обработки результатов испытаний

3.1. Расчет нормативного коэффициента теплопередачи

Расчет нормативного коэффициента теплопередачи подогревателей проводился по методике [3].

Средняя температура нагреваемой (холодной) и греющей (горячей) воды в секции (подогревателя), °С

$$t_{\text{гр}}^{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{гр}}^1 + t_{\text{гр}}^2)}{2}$$

$$t_{\text{х}}^{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{х}}^1 + t_{\text{х}}^2)}{2},$$

здесь $t_{\text{гр}}^1, t_{\text{гр}}^2$ – температура греющей воды на входе и выходе секции (подогревателя), соответственно, °С;

$t_{\text{х}}^1, t_{\text{х}}^2$ – температура нагреваемой воды на входе и выходе секции (подогревателя), соответственно, °С.

Сечение межтрубного и трубного пространства подогревателя определялось по следующим формулам:

$$F_{\text{мтр}} = \frac{D_{\text{вн}}^2 \pi}{4} - N \frac{d_{\text{тр}}^2 \pi}{4},$$

$$F_{\text{тр}} = N \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4},$$

здесь $F_{\text{тр}}$ – проходное сечение трубного пространства, м²;

$F_{\text{мтр}}$ – проходное сечение межтрубного пространства, м²;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр корпуса секции, м;

$d_{\text{тр}}$ – диаметр теплообменной трубки, м;

N – количество теплообменных трубок.

Фактические скорости воды в трубках и межтрубном пространстве рассчитывались по формулам, м/с:

$$W_{\text{мтр}} = \frac{G_{\text{г}}}{3,6F_{\text{мтр}}\rho_{\text{в}}},$$

$$W_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{х}}}{3,6F_{\text{тр}}\rho_{\text{в}}},$$

здесь $G_{\text{х}}$ – расход нагреваемой воды, кг/с;

$G_{\text{г}}$ – расход греющей воды, кг/с;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³.

Эквивалентные диаметры трубного и межтрубного пространства. Для теплообменной трубки эквивалентный диаметр равен внутреннему диаметру трубки, м:

$$d_{\text{экв.тр}} = d_{\text{вн}} = d_{\text{тр}} - 2\delta_{\text{ст}},$$

здесь $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки трубки, м;

$d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр теплообменной трубки, м.

Эквивалентный диаметр межтрубного пространства, м

$$d_{\text{экв.мтр.}} = \frac{4F_{\text{мтр}}}{\pi D_{\text{вн}} + N\pi d_{\text{тр}}}.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке трубы, рассчитывается по формуле, Вт/м² К:

$$\alpha_1 = 1,16[1210 + 18t_{\text{ср}}^{\text{г}} - 0,038t_{\text{ср}}^{\text{г}^2}] \frac{W_{\text{мтр}}^{0,8}}{d_{\text{экв.мтр}}^{0,2}}$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой среде, находится, Вт/м² К:

$$\alpha_2 = 1,16[1210 + 18t_{\text{ср}}^{\text{х}} - 0,038t_{\text{ср}}^{\text{х}^2}] \frac{W_{\text{тр}}^{0,8}}{d_{\text{экв.тр}}^{0,2}}$$

Коэффициент теплопередачи определяется выражением, Вт/м² К:

$$k_{\text{н}} = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}},$$

здесь ψ – коэффициент эффективности теплообмена;

β – коэффициент, учитывающий загрязнение поверхности трубок, Вт/м² К;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубки, Вт/м² К;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к нагреваемой воде;

$\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки теплообменной трубки, м;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала теплообменной трубки, Вт/м К.

3.2. Расчет фактических термодинамических показателей секций подогревателей

В отчете представлены результаты испытаний теплообменных аппаратов ПТВ-2, 3, 4 и ТТАИ в целом, без уточнения данных для отдельных секций.

Измерение расходов греющей и нагреваемой воды позволило свести тепловые балансы для подогревателей, определяемого по уравнению:

$$Q = G_{\text{г}} c_p (t_{\text{г1}} - t_{\text{г2}}) = G_{\text{х}} c_p (t_{\text{х2}} - t_{\text{х1}}),$$

здесь Q – количество переданной теплоты, Вт;

$G_{\text{г}}, G_{\text{х}}$ – расходы нагреваемой и греющей воды секции (подогревателя), соответственно, кг/с;

$t_{\text{г1}}, t_{\text{г2}}$ – температуры греющей воды на входе и выходе секции (подогревателя), соответственно, °С;

$t_{\text{х2}}, t_{\text{х1}}$ – температуры нагреваемой воды на выходе и входе секции (подогревателя), соответственно, °С;

c_p – удельная теплоемкость воды, кДж/кг К.

Фактический коэффициент теплопередачи для секции и подогревателя в целом определялся по следующей формуле, Вт/м² К:

$$k_{\text{ф}} = \frac{Q}{\Delta t F_{\text{нов}}}, \text{ где}$$

Δt - среднелогарифмический температурный напор, °С;

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln(1 + \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}})}, \text{ где}$$

Δt_{δ} – больший температурный напор (разность между температурами греющей и нагреваемой среды), °С;

$\Delta t_{\text{м}}$ – меньший температурный напор, °С;

$F_{\text{пов}}$ - площадь поверхности теплообмена, м².

Тепловая нагрузка на 1 °С располагаемого температурного напора рассчитывался по формуле, кВт/К [6]:

$$q = \frac{Q}{(t_{\text{г1}} - t_{\text{х1}}) \cdot 1000}$$

3.3. Расчет гидравлических сопротивлений

Для расчета гидравлического сопротивления ТТАИ в теплообменном аппарате по греющей и нагреваемой воде выделен ряд аналогичных участков (рисунок 3.1): входа (выхода) воды в подводящий (отводящий) коллектор (1, 4), входа (выхода) воды в секцию теплообменного аппарата (2, 5), секция теплообменного аппарата (3,6). Разделение по участкам связано с различным проходным сечением данных участков. Гидравлическое сопротивление греющей и нагреваемой воды находилось по идентичным формулам.

Гидравлическое сопротивление ТТАИ определялось по формуле, кПа:

$$\Sigma P_{\text{х}} = \Delta P_1^{\text{х}} + \Delta P_2^{\text{х}} + \Delta P_3^{\text{х}}$$

здесь, $\Delta P_1^{\text{х}}$ – гидравлическое сопротивление входа (выхода) воды в подводящий (отводящий) коллектор, кПа;

$\Delta P_2^{\text{х}}$ – гидравлическое сопротивление входа/выхода воды к ТТАИ, кПа;

$\Delta P_3^{\text{х}}$ – гидравлическое сопротивление секции теплообменника, кПа.

Гидравлическое сопротивление входа (выхода) воды в подводящий (отводящий) коллектор находится по формуле, кПа:

$$\Delta P_1^{\text{х}} = \left[\left(\lambda_{\text{гл}} * \left(\frac{L_{\text{х}}^k}{D_{\text{х}}^k} \right) + 2 * \xi_{\text{вх}} + \xi_1 \right) * \left(\frac{\rho * w_{\text{х}}^k}{2} \right) \right] * 2/1000,$$

здесь, $\lambda_{\text{гл}}$ – коэффициент трения для гладких труб;

L_x^k – длина участка входа/выхода нагреваемой воды к коллектору, м;

D_x^k – внутренний диаметр трубы входа/выхода нагреваемой воды к коллектору, м;

$\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент местных сопротивлений, определяющий поворот потока на 90° , $\xi_{\text{вх}} = 1.5$;

ξ_1 – коэффициент местных сопротивлений, определяющий сужение/расширение потока, $\xi_{\text{вх}} = 0.5$;

ρ – плотность воды, кг/м³;

w_x^k – скорость потока входа/выхода нагреваемой воды к коллектору, м/с.

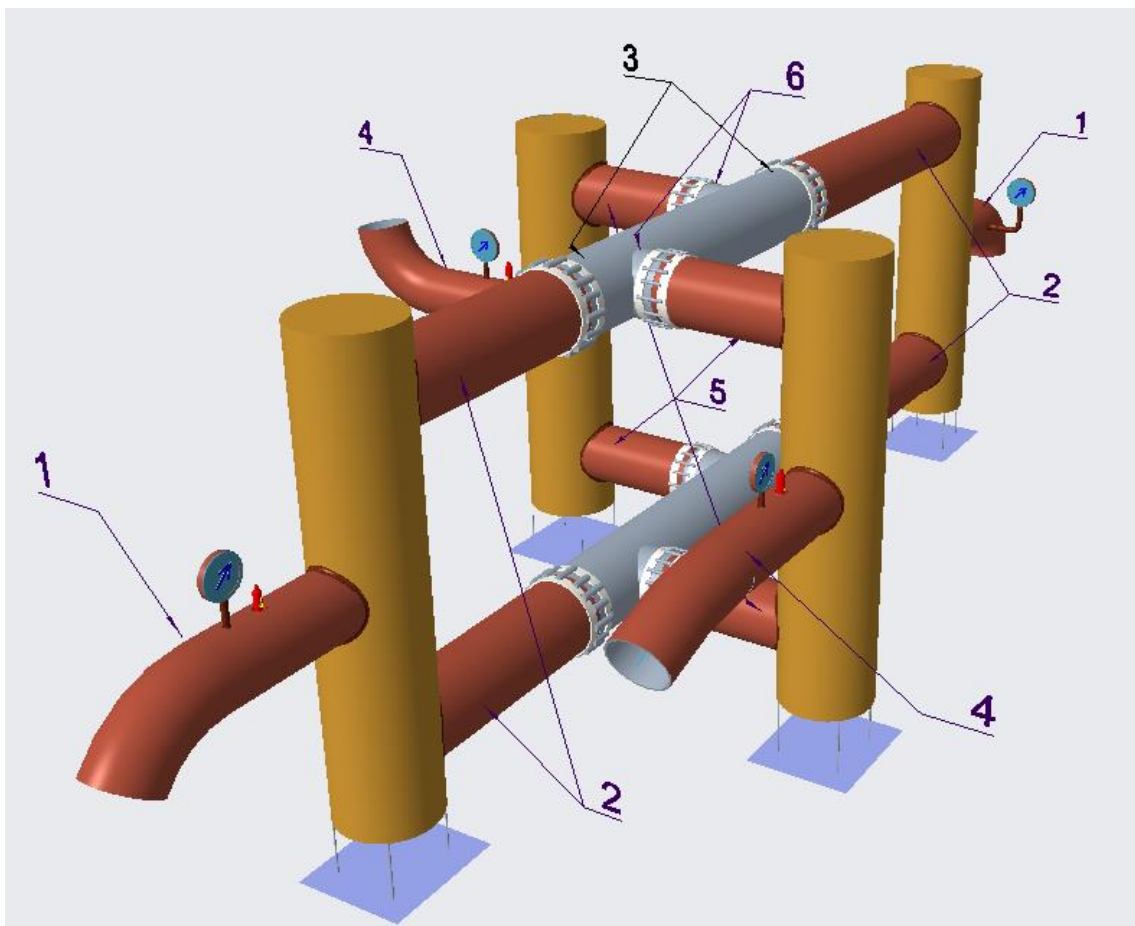


Рисунок 3.1. Схема гидравлических участков ТТАИ. 1 (4) – участок входного/выходного коллектора по холодной (горячей) воде; 2, 5 – участок трубопровода входа/выхода холодной (горячей) воды в секцию ТТАИ; 3 (6) – секция ТТАИ по трубному (межтрубному) пространству.

Гидравлическое сопротивление участка входа (выхода) воды в теплообменник определяется по формуле, кПа:

$$\Delta P_2^x = \left(\lambda_{\text{гл}} * \left(\frac{L_x^{k.\text{ттаи}}}{D_x^{k.\text{ттаи}}} \right) + 2 * \xi_{\text{вх}} \right) * \left(\frac{\rho * w_x^{\text{ттаи.сек}^2}}{2} \right),$$

здесь $L_x^{k.\text{ттаи}}$ – длина трубопровода входа/выхода нагреваемой воды к ТТАИ, м; $D_x^{k.\text{ттаи}}$ – внутренний диаметр трубопровода входа/выхода нагреваемой воды к ТТАИ;

$w_x^{\text{ттаи.сек}}$ – скорость потока нагреваемой воды к ТТАИ в одной секции.

Гидравлическое сопротивление теплообменника рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_3^x = \lambda_{\text{гл}} * \left(\frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{гл}}} \right) * \left(\frac{L_x^{\text{ттаи}}}{d_{\text{тр}}} \right) * \left(\frac{\rho * w_{\text{тр}}^2}{2} \right),$$

здесь, $L_x^{\text{ттаи}}$ – длина ТТАИ, м;

$d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр теплообменной трубки, м;

$w_{\text{тр}}$ – скорость потока нагреваемой воды в теплообменных трубках, м;

$\lambda_{\text{пр}}$ – коэффициент трения профилированных трубок.

Трубки, установленные в ТТАИ, по своей форме очень похожи на широко распространенные в энергетических теплообменных аппаратах профильные витые трубки (ПВТ) [5]. Для этих трубок относительный коэффициент гидравлического сопротивления определяется:

$$\frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{гл}}} = 1 + 13 \left(\frac{3h}{zs} \right) + 94 \left(\frac{3h}{zs} \right)^2,$$

здесь, h – глубина канавки профилирования;

s – шаг канавки;

z – число заходов профилирования.

Расчетный анализ показал, что в данной формуле отношение $(3/z)$ должно быть равно 1, что означает трехзаходное профилирование трубки ТТАИ (в таблице 1.2 число заходов профилирования $z = 1$). В этом случае $\lambda_{\text{пр}}/\lambda_{\text{гл}} \approx 3.5$.

4. Результаты испытаний

В процессе испытаний теплообменников Гурзуфской котельной в апреле 2020 г. реализовано несколько режимов с изменением расхода холодной воды через теплообменник ТТАИ $G_{\text{хв}} = 130...290$ т/ч и горячей воды $G_{\text{гв}} = 250...285$

т/ч (соответственно, через каждую секцию расход воды был в 2 раза меньше). Большой диапазон изменения расхода холодной воды определяется необходимостью оценить эффективность теплообменников во всех эксплуатационных режимах котельной. Через ПТВ расходы холодной воды составляли $G_{хв} = 105...190$ т/ч, горячей - $G_{гв} = 235...330$ т/ч. Температура холодной воды на входе в теплообменники составляла $t_{хв} = 4...6^{\circ}\text{C}$, горячей - $t_{гв} = 90...95^{\circ}\text{C}$.

В процессе испытаний проведены 5 серий измерений для ТТАИ и 4 серии для ПТВ-2,3,4. Для каждой из серий устанавливался расход холодной и горячей воды через 1 ступень Гурзуфской котельной (все теплообменники):

1. $G_x \approx 800$ т/ч (222,2 кг/с); $G_r \approx 1180$ т/ч (327,8 кг/с)
2. $G_x \approx 600$ т/ч (166,7 кг/с); $G_r \approx 1180$ т/ч (327,8 кг/с)
3. $G_x \approx 600$ т/ч (166,7 кг/с); $G_r \approx 1150$ т/ч (319,5 кг/с)
4. $G_x \approx 500$ т/ч (138,9 кг/с); $G_r \approx 1150$ т/ч (319,5 кг/с)
5. $G_x \approx 800$ т/ч (222,2 кг/с); $G_r \approx 1180$ т/ч (327,8 кг/с) (только ТТАИ)

В 5 серии замеры снимались только на ТТАИ.

При обработке результатов испытаний анализировались тепловые балансы по холодной и горячей воде, оценивалось фактическое и расчетное гидравлическое сопротивление теплообменника ТТАИ, сопоставлялась тепловая эффективность ТТАИ и ПТВ. В таблицах П4.1...П4.4 приведены результаты испытаний теплообменников. В таблице П4.5 представлены результаты испытаний подогревателей ПТВ, проведенные в ноябре 2019 г.

4.1. Тепловой и материальный баланс

На рисунке 4.1 приведены данные по сведению тепловых балансов для подогревателей. В большинстве опытов небаланс по горячей и холодной воде не превышал 10%. Здесь необходимо отметить, что измерение температуры теплоносителей для ПТВ с помощью оптического пирометра если и вносило

определенную погрешность, то эта погрешность имела систематический характер и незначительно повлияла на сведение тепловых балансов.

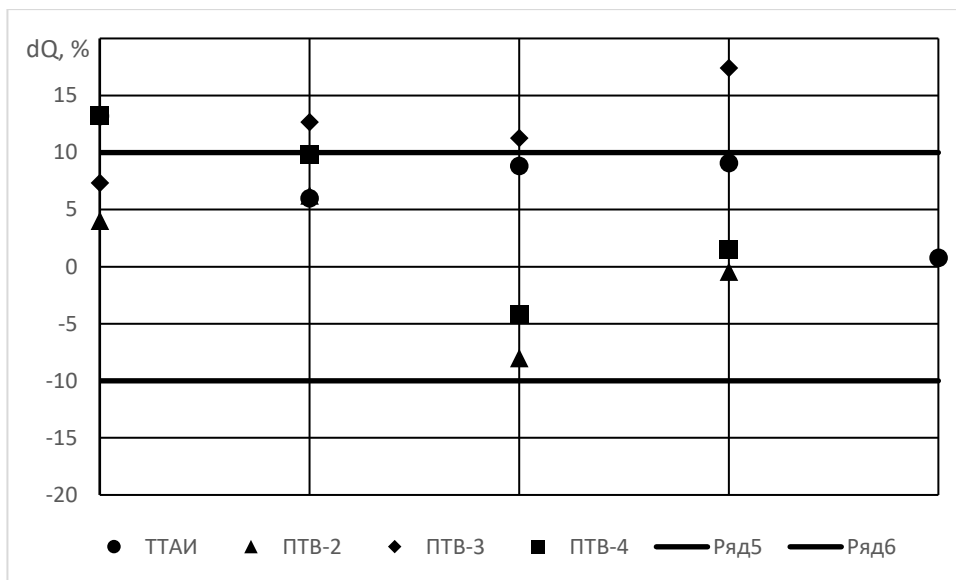


Рисунок 4.1. Тепловой баланс подогревателей

Материальный баланс сводился сравнением показаний штатных расходомеров по расходу греющей (горячей) и нагреваемой (холодной) воды в первую ступень подогрева котельной и суммой измеренных расходов на все подогреватели по штатному расходомеру. Небаланс расходов на всех режимах не превышал 5%.

4.2. Гидравлическое сопротивление ТТАИ

Гидравлическое сопротивление ТТАИ определялось по холодной и горячей воде. При расчете гидравлического сопротивления в теплообменнике (схеме) ТТАИ выделены три участка по холодной и горячей воде. Выделение участков определялось различными диаметрами этих участков (см. рисунок 3.1) и соответствующими характерными скоростями воды. Результаты расчета гидравлического сопротивления участков приведены в таблице П4.1. Обращает на себя внимание повышенное сопротивление участка входа/выхода греющей воды к коллектору, составляющее более половины сопротивления теплообменника по горячей воде. Это связано с выбором диаметра подводящей трубы греющей среды - $D_y = 150$ мм, тогда как остальные элементы теплообменника имеют $D_y = 200$ или 250 мм.

При расчете секции ТТАИ использована формула для коэффициента сопротивления трубок, аналогичная формуле для профильных витых трубок [5], см. раздел 3. В соответствии с этими данными сопротивление трубок ТТАИ в 3.5 раза превышает сопротивление гладких трубок.

На рисунке 4.2 представлены данные по фактическому и расчетному гидравлическому сопротивлению теплообменника ТТАИ. Фактическое сопротивление ТТАИ обозначено точками. По холодной воде при расходе $G_B = 150$ т/ч сопротивление модуля $\Delta P = 30$ кПа; при $G_B = 290$ т/ч – $\Delta P \approx 110$ кПа. Расчетное сопротивление (обозначено линиями) теплообменника удовлетворительно, с погрешность $\delta P \approx 20\%$ согласуется с экспериментальными данными. Расчетное сопротивление модуля по горячей воде на 40...45% выше сопротивления модуля по холодной воде.

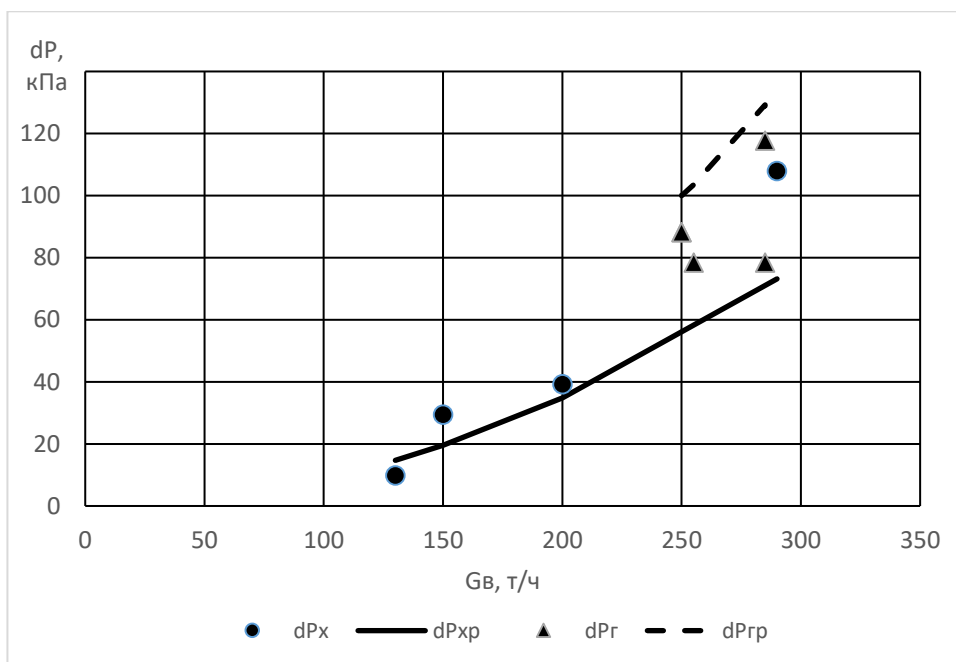


Рисунок 4.2. Гидравлическое сопротивление ТТАИ

На рисунке 4.3 приведено сопоставление расчетных значений гидравлического сопротивления ПТВ и ТТАИ. Гидравлическое сопротивление ТТАИ обозначено кривой с точками, а ПТВ – без точек. Из рисунка видно, что расчетное гидравлическое сопротивление по горячей воде (пунктирные линии) ПТВ в 2...2.5 раза ниже, чем сопротивление ТТАИ. При этом скорость горячей воды в ПТВ составляет $w_r = 1.4...1.9$ м/с, а в ТТАИ – $w_r = 2.4...2.8$ м/с. Напротив, гидравлическое сопротивление ПТВ по холодной воде в 2...2.5 раза выше,

чем сопротивление ТТАИ. Соответствующие скорости воды составляют для ПТВ $w_x = 1.2 \dots 2.2$ м/с, а в ТТАИ – $w_x = 1.2 \dots 2.7$ м/с.

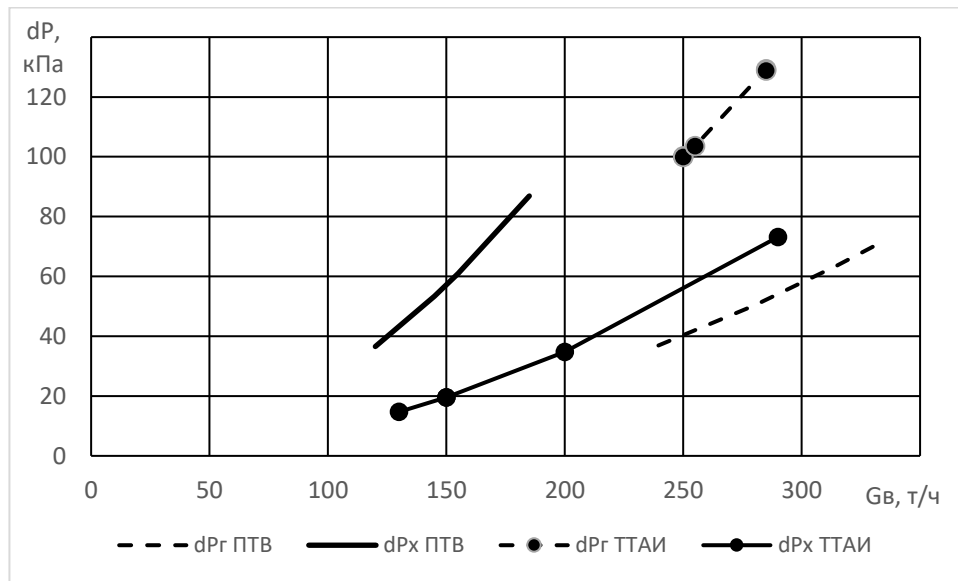


Рисунок 4.3. Расчетное сопротивление ПТВ и ТТАИ

Необходимо отметить, что повышенное гидравлическое сопротивление ТТАИ по горячей воде связано со значительным сопротивлением участка входа/выхода греющей воды к коллектору. Повышенное сопротивление привело, в частности, к тому, что расход горячей (греющей) в ПТВ-2, включенного вторым (после ТТАИ) по ходу воды в раздающем коллекторе, на 15% выше, чем в ТТАИ. Представленный анализ показывает, что при разработке схем включения ТТАИ в технологическую схему предприятий (котельных) необходимо учитывать гидравлическое сопротивление не только теплообменных секций, но и подводящих (отводящих) трубопроводов. Такая оценка может быть проведена по методике, изложенной в разделе 3.3 настоящего отчета.

4.3. Тепловая эффективность подогревателей

Для анализа тепловой эффективности теплообменного оборудования тепловых сетей в [6] рекомендуются два параметра: тепловая эффективность – ϵ и тепловая производительность на 1 градус располагаемого теплорезерва – q . Проведенный анализ результатов показал, что данные испытаний целесообразнее представлять величиной q , кВт/К

$$q = G_{\text{ХВ}} * c_p * (t_{2\text{ХВ}} - t_{1\text{ХВ}}) / (t_{1\text{ГВ}} - t_{1\text{ХВ}}),$$

здесь $G_{\text{хв}}$ – расход горячей воды, кг/с; c_p – теплоемкость воды $c_p = 4,19$ кДж/кг; $t_{2\text{хв}}$, $t_{1\text{хв}}$, $t_{1\text{гв}}$ – температуры холодной воды на выходе и входе, горячей воды на входе в теплообменник, °С.

Данный показатель позволяет в единых координатах сравнивать разные теплообменники и, фактически, характеризует способность теплообменного аппарата выполнять свои функции (в данном случае подогревать холодную воду из горводопровода).

На рисунке 4.4 приведены значения q для теплообменных аппаратов первой ступени подогрева воды Гурзуфской котельной в зависимости от расхода холодной воды через аппараты. Из рисунка видно, что значение q у ПТВ-2,3,4 выше, чем у ТТАИ. Это связано, по нашему мнению, с тем, что ТТАИ установлен вместо ПТВ-1, состоящего из трех теплообменных секций, тогда как у ПТВ-2,3,4 таких секций – 5. Необходимо отметить также, что значение q у ПТВ-4 несколько ниже, чем у ПТВ-2 и 3, что связано с пониженным расходом горячей воды на ПТВ-4 в сравнении с рядом установленными подогревателями (см. таблицы П4.1...П4.4).

На рисунке 4.4 крестиком отмечено значение q для ПТВ-1, полученное по результатам испытаний в ноябре 2019 г. (см. таблицу П4.5). Тепловая эффективность ПТВ-1 несколько ниже, чем у ТТАИ. Это свидетельствует, что ТТАИ выполняет требуемые функции (замещения ПТВ-1 согласно техническому заданию, приложение 3, на установку ТТАИ), при этом поверхность теплообмена ТТАИ составляет $F=19$ м², а ПТВ-1 - $F=78$ м², т.е. величина поверхности ПТВ примерно в 4 раза больше, чем у выполняющего такие же функции ТТАИ. Это свидетельствует о несомненной более высокой тепловой эффективности ТТАИ в сравнении с ПТВ. Необходимо, однако, отметить, что фактический коэффициент теплопередачи ПТВ-1 в 2 раза меньше расчетного значения (см. таблицу П4.5), что связано, по нашему мнению, с загрязнением аппарата, в результате его длительной эксплуатации. При замене ПТВ на дру-

гие теплообменники, в частности на ТТАИ, необходимо предусматривать запас поверхности теплообмена с учетом возможного будущего снижения тепловой эффективности аппарата из-за его загрязнения.

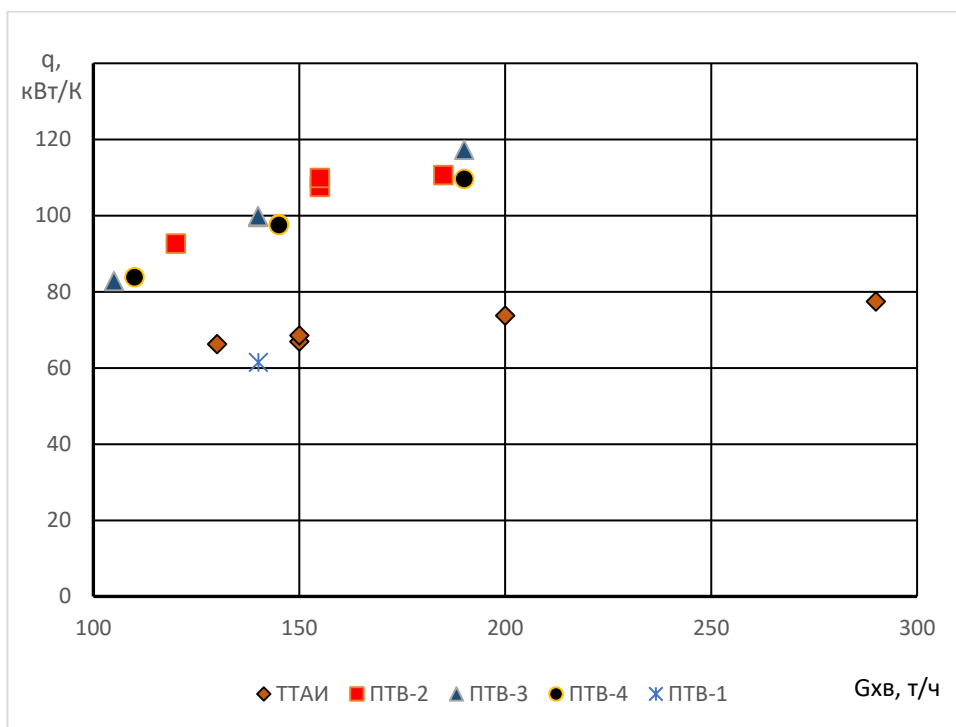


Рисунок 4.4. Тепловая эффективность подогревателей

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Проведенный анализ показал, что разработанная методика измерений позволила получить достоверные результаты, что подтверждается сведенными тепловыми и материальными балансами подогревателей и общей схемы.

2. Анализ тепловой эффективности ТТАИ показал, что ТТАИ выполняет требуемые функции по замещению ПТВ-1 согласно техническому заданию. При этом поверхность теплообмена ТТАИ составляет $F=19 \text{ м}^2$, а ПТВ-1 - $F=79 \text{ м}^2$, т.е. величина поверхности ТТАИ примерно в 4 раза меньше, чем у выполняющего такие же функции ПТВ.

3. Однако, фактический коэффициент теплопередачи ПТВ-1 в 2 раза меньше расчетного значения, что связано, с загрязнением аппарата, в резуль-

тате его длительной эксплуатации. При установке ТТАИ вместо ПТВ необходимо предусматривать запас поверхности теплообмена с учетом возможного будущего снижения тепловой эффективности ТТАИ из-за его загрязнения.

4. Анализ данных по гидравлическому сопротивлению ТТАИ согласно разработанной методике расчета показал, что: гидравлическое сопротивление теплообменного аппарата по горячей воде на 40...45% выше сопротивления по холодной воде.

5. Сравнение гидравлическое сопротивление ТТАИ и ПТВ показало, что сопротивление ТТАИ по холодной воде в 2,0...2,5 раза меньше сопротивления ПТВ, напротив, гидравлическое сопротивления ТТАИ по горячей воде в 2,0...2,5 раза больше сопротивления ПТВ (повышенное сопротивление ТТАИ по горячей воде связано со значительным сопротивлением участка входа\выхода греющей воды к коллектору). Представленные данные показывают, что при разработке схем включения ТТАИ в технологическую схему предприятий (котельных) необходимо учитывать гидравлическое сопротивление не только теплообменных секций, но и подводящих (отводящих) трубопроводов.

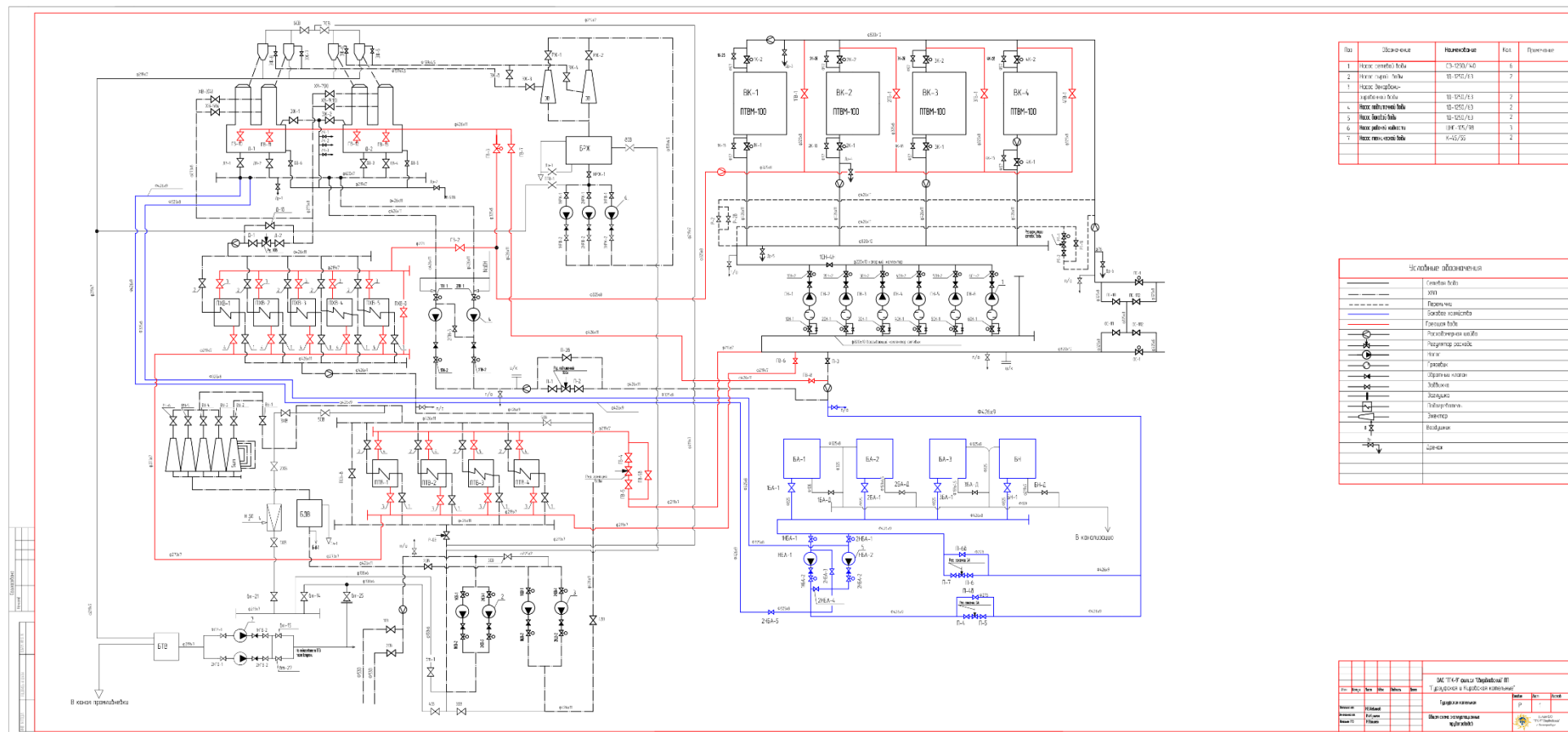
6. . Скорость горячей воды в ПТВ составляет $w_T = 1.4...1.9$ м/с, а в ТТАИ - $w_T = 2.4...2.8$ м/с. Скорости холодной воды, соответственно, - в ПТВ $w_X = 1.2...2.2$ м/с, а в ТТАИ - $w_X = 1.2...2.7$ м/с. Так как скорости воды в теплообменниках в определенной степени влияют на образование отложений на поверхности теплообмена, то учитывая близкие значения скоростей воды в ПТВ и ТТАИ для оценки показателей загрязняемости ТТАИ (темп и характер загрязнений) необходимо проведение их повторных испытаний через 2-3 отопительных сезона.

Список литературы

1. Испытание подогревателя водопроводной воды в системе подготовки подпиточной воды Гурзуфской котельной. Отчет по договору. УрФУ, 2019. 26 с.
2. ГОСТ 27590-2005. Подогреватели водо-водяные систем теплоснабжения. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 22 с.
3. Свод правил по проектированию и строительству СП 41-101-95 "Проектирование тепловых пунктов". 1995. 118 с.
4. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // Учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
5. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок. 4-е изд., перераб. и доп. / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, В.И. Брезгин, С.Н. Блинков, В.К. Купцов, М.А. Ниренштейн, П.Н. Плотников, А.Ю. Рябчиков, С.Н. Хае́т, Д.В. Брезгин, Н.В. Желонкин; под общ. ред. д.т.н. Ю.М. Бродова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 570 с.
6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети // М.-Л.: ГЭИ, 1963. 360 с.

Приложения

Тепловая схема подогрева воды Гурзуфской котельной



Программа испытаний
подогревателей Гурзуфской котельной

1. Цель испытаний

Определение теплогидравлических характеристик скоростных тонкостенных теплообменных аппаратов интенсифицированных (ТТАИ):

- фактического коэффициента теплопередачи;
- гидравлического сопротивления подогревателя;
- коэффициента эффективности подогревателя.

2. Условия проведения испытаний

Испытания проводятся в переменном режиме работы тепловой схемы.

Схема включения оборудования – стандартная.

3. Порядок проведения испытаний

3.1. Устанавливается расход нагреваемой воды 500 т/ч.

3.1.1. Проводятся измерения следующих параметров на подогревателе ТТАИ:

- температуры греющей и нагреваемой воды на входе и выходе из подогревателя;
- давление греющей и нагреваемой воды на входе и выходе из подогревателя;
- температуры греющей воды на входе и выходе каждой секции;
- расход нагреваемой воды через подогреватель.

3.1.2. Измеряется расход, давление и температура нагреваемой воды в 1 ступени подготовки воды.

3.1.3. Проводятся измерения следующих параметров на других подогревателях 1 ступени:

- температуры нагреваемой воды на входе и выходе каждой секции подогревателя;
- температуры греющей воды на входе и выходе каждой секции;
- расхода нагреваемой воды на входе в каждый подогреватель.

3.2. Устанавливается расход нагреваемой воды 600, 700, 800 т/ч.

3.2.1. Проводятся измерения, приведенные в П 3.1.1, П 3.1.2, П 3.1.3 для каждого расхода.

4. Меры безопасности

4.1. В процессе не проводятся никакие переключения, не связанные с испытанием.

4.2. Правила техники безопасности соблюдаются в объеме указанных в должностных инструкциях лиц, участвующих в испытаниях, на основании: ПТБ РД 34.03.201-97.

4.3. При незапланированных включениях и отключениях оборудования или при возникновении аварийной ситуации испытания прекращаются, оперативный персонал действует в соответствии с должностными инструкциями.

Руководителем испытаний назначить начальника цеха Маркина С.С.

От Гурзуфской котельной

Начальник цеха

С.С. Маркин

Руководитель испытаний

от УНПП «Теплоэнергетик»

К.Э. Аронсон

Техническое задание на выбор ТТАИ



Екатеринбург, +7 (343) 385-13-39,
 oro@elecom-ural.ru, www.elecom-ural.ru



Свердловский областной
 Союз промышленников
 и предпринимателей

Екатеринбург, +7 (343) 215-26-91,
 Shilov-VA@mrsk-ural.ru, http://sospp.ru

ГК ЭЛЕКОМ авторизованный представитель завода-изготовителя теплообменных аппаратов ТТАИ® на территории УрФО и Пермского края по вопросам проектирования, поставки, монтажа и обслуживания

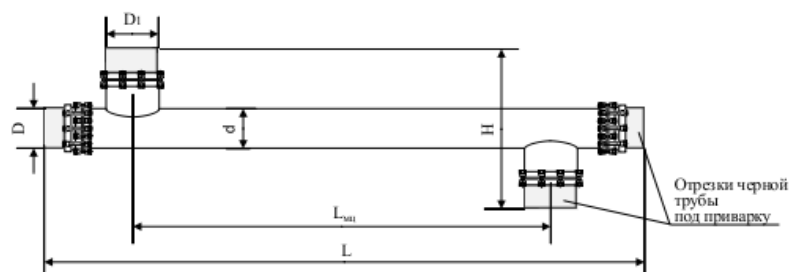
Исх. № _____ от 15.04.2019

Руководителю.

**Теплообменные аппараты ТТАИЭ
 для объекта Гурзуфская котельная**

На Ваш запрос относительно подбора теплообменных аппаратов (**Объект – Гурзуфская котельная**) сообщаем, что для подогрева 200 м³/ч пресной воды с 10 °С до 40 °С пресной водой с расходом 305.88 м³/ч и с температурой на входе в аппарат 85 °С, а на выходе 65 °С, что соответствует теплосъему 5.9694 Гкал/ч, мы можем предложить **два аппарата марки ТТАИЭ-19-666, установленных параллельно по обеим средам**. Сопротивление сборки по нагреваемой среде (трубная полость) 0.18 кгс/см², по греющей среде (межтрубная полость) 0.4 кгс/см². Максимально допустимая температура греющей среды для данного исполнения теплообменных аппаратов равна 150 °С. **Вес каждого аппарата 32 кг. Стоимость двух аппаратов 373 425 руб. (в т.ч. НДС 20%).** Стоимость указана по состоянию на складе в Екатеринбурге.

Габаритный чертеж теплообменного аппарата.



Марка аппарата	D, мм	D ₁ , мм	L, мм	L _{мц} , мм	H, мм	d, мм
ТТАИЭ-19-666	203	273	1095	525	480	200

Ген. директор ГК ЭЛЕКОМ
 +7 912 24 54 939
 dir@elecom-ural.ru

А.В. Неплохов

Таблица П4.1 - Результаты испытаний ТТАИ

Наименование	Раз- мер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим	5 ре- жим
Наружный диаметр кор- пуса ТТАИ	м	D_H	0,203	0,203	0,203	0,203	0,203
Толщина стенки трубки	м	$\delta_{тр}$	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Число трубок в секции	шт	n	344	344	344	344	344
Диаметр трубки	м	$D_{тр}$	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Коэффициент теплопро- водности трубки	Вт/м К	λ	16	16	16	16	16
Эквивалентный диаметр трубного пространства	м	$d_{экв.тр}$	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074
Длина секции	м	L	1,095	1,095	1,095	1,095	1,095
Внутренний диаметр сек- ции	м	$D_{вн}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,20
Толщина стенки секции	м	$\delta_{сек}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Внутренний диаметр трубки	м	$D_{вн}$	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Проходное сечение межтрубного простран- ства	м ²	$F_{мтр}$	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Проходное сечение труб- ного пространства	м ²	$F_{тр}$	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Температура греющей воды на входе в ТТАИ, термометр	°С	$t_{г1}$	94,0	101,0	101,0	104	93,0
Температура греющей воды на выходе из ТТАИ, термометр	°С	$t_{г2}$	70,0	77,0	79,0	84	66,0
Температура греющей воды на входе в ТТАИ, пи- рометр	°С	$t_{г1}$	87,3	93,4	93,4	98	
Температура греющей воды на выходе из ТТАИ, пирометр	°С	$t_{г2}$	66,1	71,7	71,7	78,9	
Температура нагреваемой воды на входе в ТТАИ, термометр	°С	$t_{х1}$	4,8	3,8	4,0	4,5	4,8
Температура нагреваемой воды на выходе из ТТАИ, термометр	°С	$t_{х2}$	33,0	41,0	42,0	48	25,0
Температура нагреваемой воды на входе в ТТАИ, пи- рометр	°С	$t_{х1}$	5,1	6,9	6,6	7,8	

Наименование	Раз- мер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим	5 ре- жим
Температура нагреваемой воды на выходе из ТТАИ, пирометр	°C	t_{x2}	31,3	38,5	40,2	47	
Расход нагреваемой воды после ТТАИ	кг/с	G_x	56	42	42	36	81
Расход нагреваемой воды после ТТАИ	т/ч	G_x	200	150	150	130	290
Давление нагреваемой воды на входе	кгс/см ²	P_{x1}	6	3,9	4,4	2,7	5,6
Давление нагреваемой воды на выходе	кгс/см ²	P_{x2}	5,6	3,6	3,6	2,6	4,5
Расход греющей воды	кг/с	G_r	69	71	79,2	79	69
Расход греющей воды	т/ч	G_r	250	255	285	285	250
Давление греющей воды на входе	кгс/см ²	P_{r1}	4,6	4,5	4	4,1	4,5
Давление греющей воды на выходе	кгс/см ²	P_{r2}	3,7	3,7	3,2	2,9	3,6
Количество греющей по холодной воде	МВт	Q_x	6,6	6,5	6,7	6,6	6,8
Количество греющей по горячей воде	МВт	Q_r	7,0	7,1	7,3	6,7	7,9
Тепловой небаланс $(Q_r - Q_x)/Q_r \cdot 100$	%	dQ	6,0	8,8	9,1	0,8	13,2
Гидравлическое сопротивление по нагреваемой воде	м в.ст.	dP_x	4	3	8	1	11
Гидравлическое сопротивление по греющей воде	м в.ст.	dP_r	9	8	8	12	9
Удельная теплоемкость воды	Дж/кг К	C_p	4200	4200	4200	4200	4200
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000	1000	1000	1000	1000
Средняя температура греющей воды	°C	$t_{срг}$	82,0	89,0	90,0	94,0	79,5
Средняя температура нагреваемой воды	°C	$t_{срх}$	19	22	23	26	15
Большой напор	-	Δt_6	65,2	73,2	75,0	79,5	61,2
Меньший напор	-	Δt_m	61,0	60,0	59,0	56,0	68,0
Коэффициент загрязнения поверхности труб	-	β	1	1	1	1	1
Коэффициент эффективности теплообмена	-	ψ	1	1	1	1	1
Среднелогарифмический температурный напор	-	Δt	63,1	66,4	66,7	67,1	64,5
Фактическая скорость потока в трубах	м/с	$W_{тр}$	1,9	1,4	1,4	1,2	2,7

Наименование	Раз- мер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим	5 ре- жим
Фактическая скорость по- тока в межтрубном про- странстве	м/с	$W_{\text{мтр}}$	2,5	2,5	2,8	2,8	2,5
Эквивалентный диаметр межтрубного простран- ства	м	$d_{\text{экв.мтр}}$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Коэффициент теплоот- дачи от греющей к нагре- ваемой	Вт/м ² К	α_1	16058	16855	18506	18829	15862
Коэффициент теплоот- дачи от нагреваемой к гре- ющей	Вт/м ² К	α_2	7871	6487	6527	6011	10135
Нормативный коэффици- ент теплопередачи	Вт/м ² К	k_n	4806	4306	4425	4198	5541
Площадь поверхности секции	м ²	$F_{\text{поверх}}$	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Фактический коэффици- ент теплопередачи	Вт/м ² К	$k_{\text{ф}}$	11019	10359	10534	10391	11185
Тепловая нагрузка на гра- дус располагаемого тем- пературного напора	кВт/К	q	77	74	67	69	66
Скорость холодной воды во входном/выходном коллекторе ТТАИ	м/с	w_x^k	1,8	1,3	1,3	1,1	2,6
Скорость холодной воды в трубопроводах входа/вы- хода ТТАИ (одна секция)	м/с	$w_x^{\text{ТТАИ.сек}}$	0,9	0,7	0,7	0,6	1,3
Скорость холодной воды в теплообменных трубках	м/с	$w_{\text{тр}}$	1,9	1,4	1,4	1,2	2,7
Гидравлическое сопро- тивление участка входа/выхода нагревае- мой воды к коллектору	КПа	ΔP_1^x	11,2	6,3	6,3	4,7	23,5
Гидравлическое сопро- тивление участка входа/выхода нагревае- мой воды к ТТАИ	КПа	ΔP_2^x	1,3	0,7	0,7	0,5	2,7
Гидравлическое сопро- тивление нагреваемой воды теплообменника	КПа	ΔP_3^x	22,3	12,6	12,6	9,4	46,9
Сумма Гидравлических сопротивлений нагревае- мой воды	КПа	$\Sigma \Delta P^x$	34,8	19,6	19,6	14,7	73,2
Сумма Гидравлических сопротивлений нагревае- мой воды	м.вод.ст	$\Sigma \Delta P^x$	3,5	2,0	2,0	1,5	7,5

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим	5 режим
Скорость горячей воды во входном/выходном коллекторе ТТАИ	м/с	w_{Γ}^k	3,9	4,0	4,5	4,5	3,9
Скорость горячей воды в трубопроводах входа/выхода ТТАИ (одна секция)	м/с	$w_{\Gamma}^{\text{ттаи.сек}}$	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Скорость горячей воды в ТТАИ	м/с	$w_{\Gamma}^{\text{ттаи}}$	2,5	2,5	2,8	2,8	1,4
Гидравлическое сопротивление участка входа/выхода греющей воды к коллектору	КПа	ΔP_1^{Γ}	55,6	57,8	72,3	72,3	55,6
Гидравлическое сопротивление участка входа/выхода греющей воды к ТТАИ	КПа	ΔP_2^{Γ}	0,9	1,0	1,2	1,2	0,9
Гидравлическое сопротивление греющей воды теплообменника	КПа	ΔP_3^{Γ}	46,5	48,4	60,4	60,4	46,5
Сумма гидравлических сопротивлений греющей воды	КПа	$\Sigma \Delta P^{\Gamma}$	103,0	107,2	133,9	133,9	103,0
Сумма гидравлических сопротивлений греющей воды	м.в.ст	$\Sigma \Delta P^{\Gamma}$	10,5	10,9	13,7	13,7	10,5

Таблица П4.2 - Результаты испытаний ПТВ-2

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
Наружный диаметр корпуса ПТВ	м	$D_{\text{н}}$	0,325	0,325	0,325	0,325
Толщина стенки трубки	м	$\partial_{\text{тр}}$	0,001	0,001	0,001	0,001
Число трубок в секции	шт	n	108	108	108	108
Диаметр трубки	м	$D_{\text{тр}}$	0,019	0,019	0,019	0,019
Коэффициент теплопроводности трубки	Вт/м К	Λ	16	16	16	16
Эквивалентный диаметр трубного пространства	м	$d_{\text{экв.тр}}$	0,017	0,017	0,017	0,017
Длина секции	м	L	4,08	4,08	4,08	4,08
Внутренний диаметр секции	м	$D_{\text{вн}}$	0,315	0,315	0,315	0,315
Толщина стенки секции	м	$\partial_{\text{сек}}$	0,005	0,005	0,005	0,005
Внутренний диаметр трубки	м	$D_{\text{вн}}$	0,017	0,017	0,017	0,017

Наименование	Размер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим
Проходное сечение межтрубного пространства	м ²	F _{мтр}	0,047	0,047	0,047	0,047
Проходное сечение трубного пространства	м ²	F _{тр}	0,025	0,025	0,025	0,025
Температура греющей воды на входе в ПТВ, пирометр	°C	t _{г1}	90,3	95	93	96,9
Температура греющей воды на выходе из ПТВ, пирометр	°C	t _{г2}	64,6	68,3	68,9	74,1
Температура нагреваемой воды на входе в ПТВ, пирометр	°C	t _{х1}	4,7	5,6	6,2	6,3
Температура нагреваемой воды на выходе из ПТВ, пирометр	°C	t _{х2}	48,7	58,9	59,1	66,4
Расход нагреваемой воды после ПТВ	кг/с	G _х	51,4	43,1	43,1	33,3
Расход нагреваемой воды после ПТВ	т/ч	G _х	185	155	155	120
Расход греющей воды	кг/с	G _г	91,7	91,7	87,5	87,5
Расход греющей воды	т/ч	G _г	330	330	315	315
Количество греющей по холодной воде	МВт	Q _х	9,5	9,6	9,6	8,4
Количество греющей по горячей воде	МВт	Q _г	9,9	10,3	8,9	8,4
Тепловой небаланс (Q _г -Q _х)/Q _г *100	%	dQ	4,0	6,2	-8,0	-0,4
Удельная теплоемкость воды	Дж/кг К	C _p	4200	4200	4200	4200
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000	1000	1000	1000
Средняя температура греющей воды	°C	t _{срг}	77,5	81,65	80,95	85,5
Средняя температура нагреваемой воды	°C	t _{срх}	26,7	32,3	32,65	36,35
Большой напор	-	Δt _б	59,9	62,7	62,7	67,8
Меньший напор	-	Δt _м	41,6	36,1	33,9	30,5
Коэффициент загрязнения поверхности труб	-	β	0,8	0,8	0,8	0,8
Коэффициент эффективности теплообмена	-	ψ	0,95	0,95	0,95	0,95
Среднелогарифмический температурный напор	-	Δt	50,2	48,2	46,8	46,7
Фактическая скорость потока в трубках	м/с	W _{тр}	2,1	1,8	1,8	1,4

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
Фактическая скорость потока в межтрубном пространстве	м/с	$W_{\text{мтр}}$	1,9	1,9	1,8	1,8
Эквивалентный диаметр межтрубного пространства	м	$d_{\text{экв.мтр}}$	0,025	0,025	0,025	0,025
Коэффициент теплоотдачи от греющей к нагреваемой	Вт/м ² К	α_1	9750	9956	9560	9770
Коэффициент теплоотдачи от нагреваемой к греющей	Вт/м ² К	α_2	7881	7200	7226	6079
Нормативный коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k_n	2603	2518	2488	2307
Площадь поверхности секции	м ²	$F_{\text{поверх}}$	131,5	131,5	131,5	131,5
Фактический коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k_f	1439	1521	1553	1370
Тепловая нагрузка на градус располагаемого температурного напора	кВт/К	q	111	110	108	93

Таблица П4.3 - Результаты испытаний ПТВ-3

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
Наружный диаметр корпуса ПТВ	м	D_n	0,325	0,325	0,325	0,325
Толщина стенки трубки	м	$\delta_{\text{тр}}$	0,001	0,001	0,001	0,001
Число трубок в секции	шт	n	108	108	108	108
Диаметр трубки	м	$D_{\text{тр}}$	0,019	0,019	0,019	0,019
Коэффициент теплопроводности трубки	Вт/м К	λ	16	16	16	16
Эквивалентный диаметр трубного пространства	м	$d_{\text{экв.тр}}$	0,017	0,017	0,017	0,017
Длина секции	м	L	4,08	4,08	4,08	4,08
Внутренний диаметр секции	м	$D_{\text{вн}}$	0,315	0,315	0,315	0,315
Толщина стенки секции	м	$\delta_{\text{сек}}$	0,005	0,005	0,005	0,005
Внутренний диаметр трубки	м	$D_{\text{вн}}$	0,017	0,017	0,017	0,017
Проходное сечение межтрубного пространства	м ²	$F_{\text{мтр}}$	0,047	0,047	0,047	0,047
Проходное сечение трубного пространства	м ²	$F_{\text{тр}}$	0,025	0,025	0,025	0,025

Наименование	Размер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим
Температура греющей воды на входе в ПТВ, пи- рометр	°C	$t_{г1}$	89	94,7	93,9	95,1
Температура греющей воды на выходе из ПТВ, пи- рометр	°C	$t_{г2}$	60,1	67,2	66,7	70,6
Температура нагреваемой воды на входе в ПТВ, пи- рометр	°C	$t_{х1}$	3,8	4,7	5,1	5,3
Температура нагреваемой воды на выходе из ПТВ, пи- рометр	°C	$t_{х2}$	48,9	59,6	59,4	66
Расход нагреваемой воды после ПТВ	кг/с	G_x	52,8	38,9	38,9	29,2
Расход нагреваемой воды после ПТВ	т/ч	G_x	190	140	140	105
Расход греющей воды	кг/с	$G_{г}$	88,9	88,9	87,5	87,5
Расход греющей воды	т/ч	$G_{г}$	320	320	315	315
Количество греющей по холодной воде	МВт	Q_x	10,0	9,0	8,9	7,4
Количество греющей по горячей воде	МВт	$Q_{г}$	10,8	10,3	10,0	9,0
Тепловой небаланс $(Q_{г}-Q_x)/Q_{г}*100$	%	dQ	7,3	12,7	11,3	17,4
Удельная теплоемкость воды	Дж/кг К	C_p	4200	4200	4200	4200
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000	1000	1000	1000
Средняя температура гре- ющей воды	°C	$t_{срг}$	74,6	80,95	80,3	82,85
Средняя температура нагреваемой воды	°C	$t_{срх}$	26,4	32,2	32,25	35,65
Большой напор	-	Δt_6	56,3	62,5	61,6	65,3
Меньший напор	-	Δt_m	40,1	35,1	34,5	29,1
Коэффициент загрязнения поверхности труб	-	β	0,8	0,8	0,8	0,8
Коэффициент эффектив- ности теплообмена	-	ψ	0,95	0,95	0,95	0,95
Среднелогарифмический температурный напор	-	Δt	47,7	47,5	46,7	44,8
Фактическая скорость по- тока в трубах	м/с	$W_{тр}$	2,2	1,6	1,6	1,2
Фактическая скорость по- тока в межтрубном про- странстве	м/с	$W_{мтр}$	1,9	1,9	1,8	1,8
Эквивалентный диаметр межтрубного простран- ства	м	$d_{эkv.мтр}$	0,025	0,025	0,025	0,025

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
Коэффициент теплоотдачи от греющей к нагреваемой	Вт/м ² К	α_1	9371	9681	9529	9648
Коэффициент теплоотдачи от нагреваемой к греющей	Вт/м ² К	α_2	8023	6631	6637	5431
Нормативный коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k_n	2586	2401	2389	2170
Площадь поверхности секции	м ²	$F_{\text{поверх}}$	131,5	131,5	131,5	131,5
Фактический коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k_f	1592	1436	1443	1262
Тепловая нагрузка на градус располагаемого температурного напора	кВт/К	q	117	100	100	83

Таблица П4.4 - Результаты испытаний ПТВ-4

Наименование	Размерность	Обозначение	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим
Наружный диаметр корпуса ПТВ	м	D_n	0,325	0,325	0,325	0,325
Толщина стенки трубки	м	$\delta_{\text{тр}}$	0,001	0,001	0,001	0,001
Число трубок в секции	шт	n	108	108	108	108
Диаметр трубки	м	$D_{\text{тр}}$	0,019	0,019	0,019	0,019
Коэффициент теплопроводности трубки	Вт/м К	λ	16	16	16	16
Эквивалентный диаметр трубного пространства	м	$d_{\text{экв.тр}}$	0,017	0,017	0,017	0,017
Длина секции	м	L	4,08	4,08	4,08	4,08
Внутренний диаметр секции	м	$D_{\text{вн}}$	0,315	0,315	0,315	0,315
Толщина стенки секции	м	$\delta_{\text{сек}}$	0,005	0,005	0,005	0,005
Внутренний диаметр трубки	м	$D_{\text{вн}}$	0,017	0,017	0,017	0,017
Проходное сечение межтрубного пространства	м ²	$F_{\text{мтр}}$	0,047	0,047	0,047	0,047
Проходное сечение трубного пространства	м ²	$F_{\text{тр}}$	0,025	0,025	0,025	0,025
Температура греющей воды на входе в ПТВ, пирометр	°С	t_{r1}	89,6	95,2	95,1	94,4
Температура греющей воды на выходе из ПТВ, пирометр	°С	t_{r2}	56,5	65,2	64,5	66,8

Наименование	Размер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим
Температура нагреваемой воды на входе в ПТВ, пи- рометр	°C	t_{x1}	4,1	5,1	5,1	5,2
Температура нагреваемой воды на выходе из ПТВ, пирометр	°C	t_{x2}	46,4	57,2	57	63,5
Расход нагреваемой воды после ПТВ	кг/с	G_x	52,8	40,3	40,3	30,6
Расход нагреваемой воды после ПТВ	т/ч	G_x	190	145	145	110
Расход греющей воды	кг/с	G_r	77,8	77,8	65,6	65,6
Расход греющей воды	т/ч	G_r	280	280	236	236
Количество греющей по холодной воде	МВт	Q_x	9,4	8,8	8,8	7,5
Количество греющей по горячей воде	МВт	Q_r	10,8	9,8	8,4	7,6
Тепловой небаланс ($Q_r - Q_x$)/ $Q_r \cdot 100$	%	dQ	13,3	10,1	-4,2	1,5
Удельная теплоемкость воды	Дж/кг К	C_p	4200	4200	4200	4200
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000	1000	1000	1000
Средняя температура гре- ющей воды	°C	$t_{срг}$	73,1	80,2	79,8	80,6
Средняя температура нагреваемой воды	°C	$t_{срх}$	25,3	31,2	31,05	34,35
Большой напор	-	Δt_6	52,4	60,1	59,4	61,6
Меньший напор	-	Δt_m	43,2	38	38,1	30,9
Коэффициент загрязнения поверхности труб	-	β	0,8	0,8	0,8	0,8
Коэффициент эффектив- ности теплообмена	-	ψ	0,95	0,95	0,95	0,95
Среднелогарифмический температурный напор	-	Δt	47,7	48,2	48,0	44,5
Фактическая скорость по- тока в трубах	м/с	$W_{тр}$	2,2	1,6	1,6	1,2
Фактическая скорость по- тока в межтрубном про- странстве	м/с	$W_{мтр}$	1,6	1,6	1,4	1,4
Эквивалентный диаметр межтрубного простран- ства	м	$d_{экв.мтр}$	0,025	0,025	0,025	0,025
Коэффициент теплоот- дачи от греющей к нагре- ваемой	Вт/м ² К	α_1	8355	8668	7545	7575
Коэффициент теплоот- дачи от нагреваемой к гре- ющей	Вт/м ² К	α_2	7938	6759	6753	5574

Наименование	Размер- ность	Обо- значе- ние	1 ре- жим	2 ре- жим	3 ре- жим	4 ре- жим
Нормативный коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k _н	2466	2333	2215	2033
Площадь поверхности секции	м ²	F _{поверх}	131,5	131,5	131,5	131,5
Фактический коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k _ф	1496	1390	1392	1279
Тепловая нагрузка на градус располагаемого температурного напора	кВт/К	q	110	98	98	84

Таблица П4.5 - Результаты испытаний ПТВ-2, 3, 4 в ноябре 2019 г.

Наименование	Размер- ность	Обозначение	ПТВ-1	ПТВ-2	ПТВ-3	ПТВ-4
Температура греющей воды на входе в ПТВ	°С	t _{г1}	91,0	90,8	90,7	90,8
Температура греющей воды на выходе из ПТВ	°С	t _{г1}	76,6	66,4	66,6	64,6
Температура нагреваемой воды на входе в ПТВ	°С	t _{х1}	9,7	10,0	10,1	10,2
Температура нагреваемой воды на выходе из ПТВ	°С	t _{х2}	40,3	57,8	56,8	54,7
Коэффициент теплопроводности трубки	Вт/м К	λ	16	16	16	16
Расход холодной воды после выхода из ПТВ	кг/с	G _х	38,9	31,9	30,5	34,7
Удельная теплоемкость воды	Дж/кг К	C _p	4200	4200	4200	4200
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000	1000	1000	1000
Средняя температура греющей воды	°С	t _{срг}	83,8	1000	78,7	77,7
Средняя температура нагреваемой воды	°С	t _{срх}	25	78,6	33,5	32,5
Больший среднеарифметический напор	-	Δ _{тб}	66,9	34	56,5	54,4
Меньший среднеарифметический напор	-	Δ _{тм}	50,7	56,4	33,9	36,1
Коэффициент загрязнения поверхности труб	-	β	0,8	33,0	0,80	0,8

Наименование	Размерность	Обозначение	ПТВ-1	ПТВ-2	ПТВ-3	ПТВ-4
Коэффициент эффективности теплообмена	-	ψ	0,95	0,8	0,95	0,95
Среднеарифметический температурный напор	-	Δt	58,4	43,7	44,2	44,6
Расход горячей воды	кг/с	G_{Γ}	82,7	62,5	59,1	58,9
Фактическая скорость потока в трубах	м/с	$W_{\text{тр}}$	1,6	1,3	1,2	1,4
Фактическая скорость потока в межтрубках	м/с	$W_{\text{мтр}}$	1,7	1,3	1,2	1,2
Коэффициент теплоотдачи от горячей к холодной	Вт/м ² К	α_1	9261	7218	6905	6856
Коэффициент теплоотдачи от холодной к горячей	Вт/м ² К	α_2	6204	5747	5523	6070
Нормативный коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	k_n	2291	2026	1957	2037
Количество теплоты	МВт	Q	5	6,4	6,0	6,5
Фактический коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	$k_{\text{ф}}$	1084	1115	1028	1105
Тепловая нагрузка на градус располагаемого температурного напора	кВт/К	q	0,38	0,59	0,58	0,55