



С. Д. ФРОЛОВ, В. В. СМАНЦЕР,  
Е. Н. КРАВЦОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ  
И СТАТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕКУПЕРАТИВНОГО  
ТЕПЛООБМЕННИКА**

1990

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ  
Харьковский ордена Ленина авиационный институт  
им. Н.Е. Жуковского

С.Д. Фролов, В.В. Сманцер,  
Е.Н. Кравцов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Учебное пособие по лабораторным работам

Харьков ХАИ 1990

Экспериментальное определение выходных параметров и статических характеристик рекуперативного теплообменника: Учеб. пособие по лаб. работам / С.Д. Фролов, Э.В. Сманцер, Е.Н. Кравцов. - Харьков, Харьк. авиац. ин-т, 1990. - 37 с.

Описан лабораторный стенд для исследования работы масляно-воздушного рекуперативного теплообменника, рассмотрен порядок проведения эксперимента и обработки опытных данных, дан алгоритм поверочного теплового расчета теплообменника. Представлены порядок проведения теплового и гидравлического расчетов теплообменника, снятия на стенде опытных данных и их обработка, а также сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных результатов. Кратко описаны статические характеристики рекуперативного теплообменника, порядок проведения экспериментов для получения этих характеристик на лабораторном стенде, представлены исходные данные для расчета характеристик теплообменника на ЭВМ по программе, заложенной в память машины.

Для студентов энергетических специальностей по дисциплине "Теплопередача и теплообменные аппараты".

Ил. 2. Табл. 7. Библиогр.: 5 назв.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Мацевитый,  
канд. техн. наук, доц. А.А. Левченко

## Лабораторная работа № I

## ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ РЕКУПЕРАТОРА.

Введение

В инженерной практике часто возникают задачи, связанные с отводом определенного количества теплоты от различных элементов конструкции авиационной и ракетно-космической техники. Решаются они с помощью систем охлаждения, основным агрегатом которых является теплообменник, в частности, им может быть рекуператор.

Для каждой конкретной задачи можно спроектировать и построить соответствующий рекуперативный теплообменник или по каталогу промышленной продукции подобрать нужный рекуператор с известной схемой движения рабочих жидкостей и известной поверхностью теплообмена. При выборе рекуператора проводится его поверочный расчет, целью которого является определение конечных температур рабочих жидкостей и количества передаваемой теплоты.

Цель работы

В данной лабораторной работе объектом исследования является масловоздушный радиатор, установленный на экспериментальном стенде, имитирующем работу данного радиатора на летательном аппарате.

При выполнении этой работы студентам необходимо овладеть методикой проведения поверочного теплового и гидродинамического расчета рекуперативного теплообменника, а также получить определенные навыки для экспериментальной апробации расчетных результатов.

Для этого студенты должны:

- 1) предварительно проработать соответствующий раздел лекционного курса;
- 2) ознакомиться с устройством стенда, средствами измерения необходимых величин, методикой проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных;
- 3) на заданном установившемся режиме работы радиатора замерить нужные экспериментальные данные и обработать их

по приведенной в пособии методике ;

4) для заданных в опыте режимных параметров провести поверочный расчет теплообменника по рекомендованной методике ;

5) сопоставить и проанализировать полученные расчетные и экспериментальные результаты и сформулировать итоговые выводы.

### Стенд для исследования работы

#### масляно-воздушного рекуператора (радиатора)

Схема стенда изображена на рис. I. I. Стенд состоит из собственно радиатора I и двух систем (маслосистемы и воздушной системы), обеспечивающих его работу, а также контроль и измерение режимных параметров рабочих жидкостей.

#### Т е п л о о б м е н н и к - р а д и а т о р

Масляно-воздушный теплообменник представляет собой круглый сотовый маслорадиатор с гоكرратной прямоточно-противоточной схемы, конструкция которого изображена на рис. I. 2 , где I - трубки ; 2 - перегородки ; 3 - термостатический клапан ; 4 - шунтовая линия. Радиатор с наружным диаметром 245 мм разделен продольными перегородками по сечению на пять секций. Каждая секция содержит набор трубок из красной меди длиной

$l = 250$  мм с развальцованными на шестиграннык концами длиной по 16 мм и спаянными между собой так, что торцы их напоминают соты. Наружный диаметр трубок составляет 4,2 мм, толщина стенок 0,3 мм. Между неразвальцованными участками труб остается свободное пространство шириной  $\delta = 1$  мм.

Охлаждающий масло воздух движется внутри трубок в одном и том же направлении в каждой секции. Масло поступает через входной верхний патрубок в продольном направлении, обтекает межтрубное пространство каждой секции последовательно, меняя направление движения, затем течет между внешней и внутренней обечайками корпуса и выходит через двойной выходной патрубок.

Основные геометрические характеристики радиатора по секциям приведены в табл. II. I.

## Уточнения к описанию «Рекуперативный теплообменник ...»

1. Манометр 8 заменен на U-образный, водяной.
2. Манометр 30 и трубки полного давления 28, 29 отсутствуют, контроль гидрпотерь воздуха не ведется.
3. Термопары 9 и 10 контроля температуры масла включены дифференциально (разность температур), термопара 9 контролируется и как одиночная (температура масла на входе). Аналогично, термопары 26 и 27 контроля температуры воздуха включены дифференциально, термопара 26 контролируется и как одиночная (температура воздуха на входе).
4. Массовые расходы определяются по формулам:

$$G = \varphi \cdot F_{\text{ш}} \sqrt{2\Delta P \cdot \rho},$$

где  $\varphi, F_{\text{ш}}$  — характеристики соответствующей измерительной шайбы,  $\Delta P$  — перепад давления на ней.

5. Перемешиватель масла в баке не включается во избежание появления воздуха в маслотракте. При этом приходится мириться с некоторой неоднородностью температурного поля в баке и колебаниями (незначительными) температуры подаваемого масла.

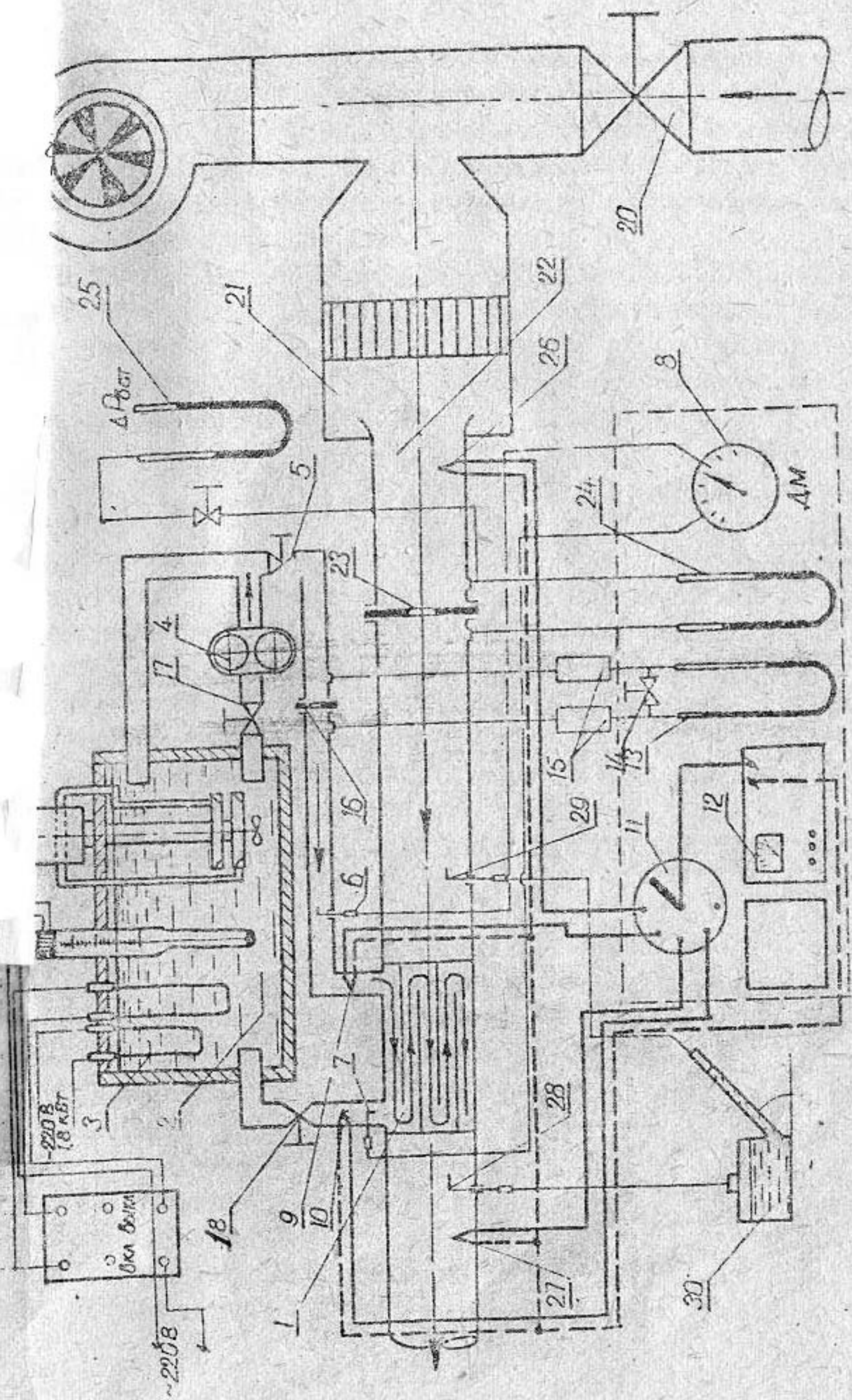


Рис. 1.1. Схема лабораторного стенда для исследования работы масляно-воздушного recuperатора

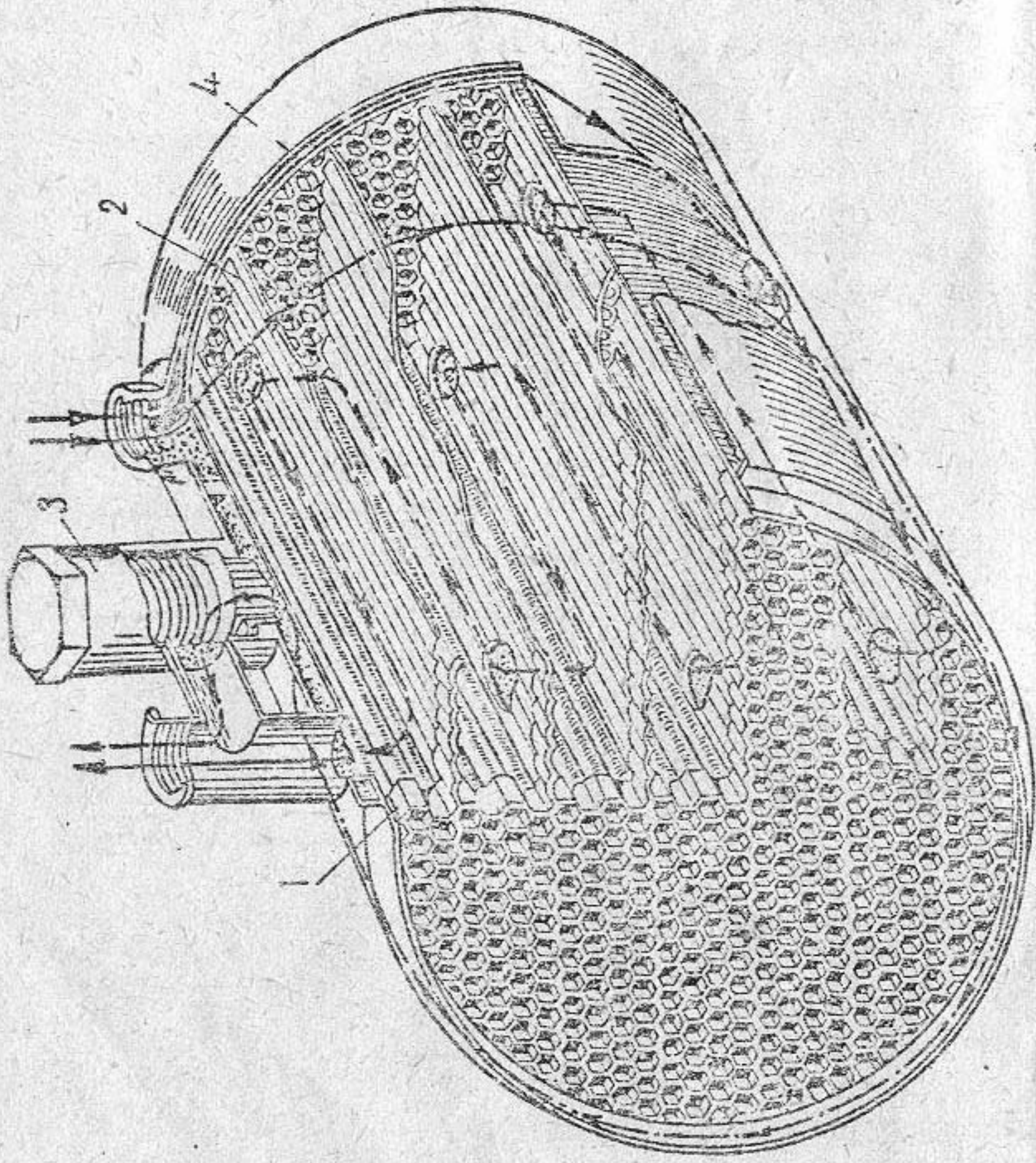


Рис. 1.2. Круглый сотовый масляно-воздушный рекуператор



## М а с л о с и с т е м а

Маслосистема предназначена для имитации параметров масла на выходе из двигателя и подачи нагретого масла в радиатор. Она включает в себя (см. рис. I. I): жидкостный термостат 2 с дополнительным подогревателем 3, перекачивающий насос 4, регулирующий игольчатый кран 5, трубопроводы с датчиками и индикаторами контрольно-измерительной системы.

Жидкостный термостат лабораторного типа СЖМ-19/2,5-41 нагревает масло до заданной температуры и автоматически поддерживает ее постоянной. Дополнительный нагреватель 3 подключается при максимальных режимах работы теплообменника. Температура масла на входе в радиатор контролируется термомпарой 9 типа ХК. На выходе из теплообменника температура масла измеряется термомпарой 10. Термомпары через переключатель П соединяются с милливольтметром типа Ш4310.

Для измерения расхода масла в трубопроводе установлена мерная шайба 16. Перепад давления на шайбе определяется по U-образному водяному манометру 13. Между мерной шайбой и манометром установлены демпфирующие масловоздушные расширители 15. Манометр снабжен краном сравнения 14, который предотвращает переливание манометрической жидкости.

Перепад давления на радиаторе измеряют с помощью трубок полного давления 6 и 7 и дифференциального манометра 3.

Расход масла через радиатор регулируется игольчатым краном 5.

## В о з д у ш н а я с и с т е м а

Воздушная система предназначена для подачи охлаждающего воздуха в радиатор. Воздух можно подавать в радиатор либо с помощью центробежного вентилятора 19 при закрытой задвижке 20, либо от турбокомпрессора при закрытой заслонке вентилятора и открытой задвижке 20, регулирующей его расход. Расход воздуха от вентилятора регулируют заслонкой на входе в него. Резивер 21 служит для сглаживания пульсаций давления воздуха после компрессора и выравнивания поля скоростей на входе в подводящий патрубок 22. В последнем установлена мерная шайба 23 для определения расхода воздуха. Перепад давления на шайбе измеряют с

помощью U-образного водяного манометра 24, а статическое давление — U-образным манометром 25. Для измерения температуры воздуха перед теплообменником и за ним ( $T_1^*$  и  $T_2^*$ ) установлены термометры 26 и 27 типа ХК. Термометры через переключатель II соединяются с милливольтметром 12.

Перепад давления воздуха на радиаторе определяют с помощью трубок полного давления 28, 29 и микроманометра 30.

### П у л ь т с т е н д а

На пульте размещены U-образные водяные манометры 13, 24 для измерения перепадов давления на мерных шайбах 16 и 23. Манометр 13 в маслосистеме имеет кран сравнения 14, расположенный на пульте сверху слева. Третий U-образный водяной манометр 25 служит для измерения статического давления воздуха

$\Delta P_{\text{ст}}$  перед мерной шайбой. На вертикальной панели стенда также размещены переключатель II для термометров с клеммами для подключения милливольтметра 1310, электрический контактор для подачи напряжения на электродвигатель маслонасоса и центробежного воздушного вентилятора, пусковые кнопки для включения электродвигателей, розетка на 220 В для включения дополнительного подогрева термостата 2.

Микроманометр 30 и милливольтметр 12 установлены на горизонтальной панели пульта.

В зависимости от положения указателя переключателя II к измерительной цепи прибора 12 подключаются различные термометры. Так, в первом и во втором положениях указателя подключаются термометры, измеряющие соответственно температуры масла на входе и выходе из радиатора, в третьем — термометр для измерения температуры воздуха на входе в радиатор, а в четвертом — седьмом — четыре термометры, измеряющие температуру воздуха за радиатором.

### Порядок проведения эксперимента

За полчаса до проведения эксперимента на контактном термометре устанавливают предварительный температурный режим подогрева масла и включают подогреватели и мешалку термостата. При достижении заданной температуры масла подогреватели термостата

автоматически отключаются и сигнальная лампа подогрева гаснет.

Потребный режим работы радиатора подбирают по расходу теплоносителей. Для этого включают вентилятор воздуха и перекачивающий маслонасос. С помощью заслонки для регулировки расхода воздуха и игольчатого крана для регулировки (расхода) масла на соответствующих манометрах 24 и 13 устанавливают необходимые перепады давления  $\Delta P_{\text{дв}}$  и  $\Delta P_{\text{дм}}$ .

Примерно через 10...15 мин устанавливается стационарный режим, о наступлении которого судят по неизменности показаний термопар для воздуха и масла. При этом происходит периодическое включение подогревателей термостата, о чем свидетельствует мигание сигнальной лампочки подогрева. На стационарном режиме снимают показания всех приборов и заносят их в табл. П.2 протокола испытаний.

После окончания эксперимента следует выключить подогреватель масла в термостате. При снижении температуры масла до 30...35°C выключить перекачивающий маслонасос и вентилятор воздуха, закрыть пробковый кран термостата 17.

#### Обработка экспериментальных данных.

##### Температура теплоносителей

Температура  $t_i$  теплоносителей определяется с помощью градуировочной табл. П.3 для хромель-копелевых термопар по измеренной в опыте величине  $e_i$  ЭДС термопары. Но в связи с тем, что градуировочная таблица получена при температуре холодного спая термопары, равной 0°C, а на стенде холодные спай всех термопар находятся при температуре  $t_0$ °C окружающей среды, то необходимо сначала по табл. П.3 для температуры  $t_0$ °C вычислить соответствующую ей величину термо-ЭДС  $e_0$  и получить суммарную величину термо-ЭДС

$$e_{x_i} = e_0 + e_i, \quad (I.1)$$

по которой с помощью табл. П.3 и определяют истинную величину температуры  $t_i$  в градусах Цельсия, а затем переводят в кельвины:

$$T_i = t_i + 273. \quad (I.2)$$

Для определения температуры воздуха на выходе из радиатора  $t_2''$  по измеренным четырема термопарами ЭДС можно найти среднюю величину ЭДС

$$e_2'' = \frac{(e_2'')_I + (e_2'')_{II} + (e_2'')_{III} + (e_2'')_{IV}}{4}, \quad (I.3)$$

затем с помощью табл. П.3 по формуле  $e_{22}'' = e_0 + e_2''$  - температуру  $t_2''$  в градусах Цельсия, а затем перевести в Кельвины:

$$T_2'' = t_2'' + 273. \quad (I.4)$$

Массовый расход и водяной эквивалент теплоносителей

#### Масло

1. Скорость масла в узком сечении потока при прохождении через измерительную шайбу  $16$ , м/с,

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P_{м шм}}{\rho_1}}. \quad (I.5)$$

2. Число Рейнольдса для потока на участке измерительной шайбы

$$Re_{шм} = \frac{\omega_1 \cdot D_1}{\nu_1}, \quad (I.6)$$

где  $D_1 = 16 \cdot 10^{-3}$  - диаметр проводящего трубопровода масла, м;  
 $\nu_1$  - кинематическая вязкость масла при  $T = T_1'$ ; м<sup>2</sup>/с (см. табл. П.4).

3. Массовый расход масла, кг/с,

$$G_1 = \varphi_M \omega_1 \cdot \rho_1 \cdot F_{шм}, \quad (I.7)$$

где  $\varphi_M = 0,9$  - коэффициент расхода измерительной шайбы для  $Re_{шм} \geq 100$ ;  $\rho_1$  - плотность масла при  $t = t_1'$ , кг/м<sup>3</sup> (см. табл. П.4);  $F = 25,4 \cdot 10^{-6}$  - площадь отверстия шайбы, м<sup>2</sup>.

4. Водяной эквивалент масла

$$W_1 = C_{p1} \cdot G_1, \quad (I.8)$$

где  $C_{p1}$  - удельная теплоемкость масла при  $t = t_1'$ , Дж/кг · К (см. табл. П.4).

Воздух

1. Скорость воздуха в узком сечении потока при прохождении шайбы, м/с,

$$w_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta P_{\text{в}} \delta_{\text{ш}}}{\rho_2}}, \quad (1.9)$$

где  $\rho_2$  - плотность воздуха перед шайбой при  $T = T_2$ , кг/м<sup>3</sup> (см. табл. II.5),

$$\rho_2 = \frac{\Delta P_{\text{в}} \delta_{\text{ш}} + B_0}{R_{\text{в}} \cdot T_2}, \quad (1.10)$$

где  $B_0$  - барометрическое давление в окружающей среде, Па;  
 $R_{\text{в}} = 287$  Дж/кг·К - газовая постоянная воздуха.

2. Число Рейнольдса в потоке воздуха на участке измерительной шайбы

$$Re_{\text{ш.б}} = \frac{w_2 \cdot D_2}{\nu_2}, \quad (1.11)$$

где  $D_2 = 0,236$  м - диаметр подводящего воздухопровода;  $\nu_2$  - кинематическая вязкость воздуха при  $t = t_2$ , м<sup>2</sup>/с (см. табл. II.5).

3. Массовый расход воздуха через радиатор, кг/с

$$G_2 = \varphi_{\text{в}} w_2 \rho_2 F_{\text{ш.б}}, \quad (1.12)$$

где  $\varphi_{\text{в}}$  - коэффициент расхода  $\varphi_{\text{в}} = 0,65$  для  $Re_{\text{ш.б}} \geq 0,5 \cdot 10^5$ ;  
 $d_{\text{ш.б}} = 0,141$  м - диаметр отверстия шайбы;  $F_{\text{ш.б}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{ш.б}}^2 = 1,565 \times 10^{-2}$  м<sup>2</sup> - площадь отверстия шайбы.

4. Массовые расходы воздуха через отдельные секции радиатора, кг/с.

$$G_{2j} = G_2 \cdot \frac{F_{2j}}{F_2}, \quad (1.13)$$

где  $F_{2j}$  ( $j = 1 \dots 5$ ) - площадь сечения  $j$ -й секции для прохода воздуха;  $F_2$  - площадь сечения для прохода воздуха всего радиатора (см. табл. II.1).

5. Водяные эквиваленты воздуха для каждой секции

$$W_{2j} = C_{\rho_2} G_{2j} \quad (j = 1, \dots, 5), \quad (1.14)$$

где  $C_{p2}$  - удельная теплоемкость воздуха при  $T=T_2'$ , Дж/кг.К (по табл. П.5).

6. Суммарный теплосъем (экспериментальная величина) в радиаторе, Дж/с,

$$Q_{оп} = C_{p1} G_1 \cdot (T_1' - T_1''). \quad (I.15)$$

7. Потеря напора в магистрали масла, Па,

$$\Delta P_1 = \Delta P_M [\text{кг/см}^2] \cdot 9,81 \cdot 10^4. \quad (I.16)$$

8. Потеря напора в тракте воздуха, Па,

$$\Delta P_2 = \Delta P_B [\text{мм.н.сп.ст}] \cdot K \cdot 9,81, \quad (I.17)$$

где  $K$  - коэффициент наклонного манометра 30.

9. Мощность, затраченная на прокачку масла по тракту радиатора, Вт,

$$N_1 = \frac{G_1 \Delta P_1}{\rho_1 \eta_1}, \quad (I.18)$$

где  $\eta_1 = 0,7$  - КПД маслонасоса.

10. Мощность, затраченная на прокачку воздуха по тракту радиатора, Вт,

$$N_2 = \frac{G_2 \cdot \Delta P_2}{\rho_2 \eta_2}, \quad (I.19)$$

где  $\eta_2 = 0,9$  - КПД воздуходувки.

II. Суммарная затрата мощности на прокачку обоих теплоносителей, Вт,

$$N_z = N_1 + N_2. \quad (I.20)$$

#### Поверочный тепловой расчет радиатора по секциям

При поверочном расчете известными (или легко определяемыми по заданным параметрам) являются следующие величины: площадь теплопередающей поверхности  $F_{pj}$ , коэффициент теплопередачи  $K_i$ , волновые эквиваленты  $W_{1j}$  и  $W_{2j}$ , начальные температуры  $T_{1j}'$  и  $T_{2j}'$  теплоносителей, искомыми - конечные темпера-

туры  $T_{1j}''$  и  $T_{2j}''$  и количество переданной теплоты в единицу времени  $Q_{pj}$  (теплосъем).

### Вычисление коэффициента теплопередачи

1. Коэффициент теплопередачи  $K_j$  для отдельной секции радиатора определяется по выражению, Дж/К·м<sup>2</sup>,

$$K_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1j}} + \frac{d_1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{2j}}}, \quad (I.21)$$

где  $\alpha_{1j}$  и  $\alpha_{2j}$  - коэффициенты теплоотдачи в секции теплообменника со стороны масла ( $\alpha_1$ ) и со стороны воздуха ( $\alpha_2$ ), Дж/м<sup>2</sup>·К;  $d_1$  и  $d_2$  - наружный и внутренний диаметры трубки, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала трубки (для меди  $\lambda = 390$  Вт/м·К).

Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{1j}$  и  $\alpha_{2j}$  для различных режимов течения теплоносителей вычисляются по следующим эмпирическим зависимостям:

а) ламинарный (вязкостный) режим течения жидкости ( $Re < 2000$ ,  $Gr_2 = 1$ ) -

$$\alpha_{1j} = 0,17 \cdot Re_{1j}^{0,33} \cdot Pr_{1j}^{0,43} \cdot Gr_{1j}^{0,1} \left( \frac{Pr_{1j}}{Pr_{1w}} \right)^{0,25} \frac{\lambda_1}{Dr_{1j}}; \quad \text{МАСЛО} \quad (I.22)$$

б) турбулентный режим течения воздуха в трубках ( $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ ) -

$$\alpha_{2j} = \left[ 0,018 \cdot Re_{2j}^{0,8} \right] \frac{\lambda_{2j}}{d_2}; \quad \text{ВОЗДУХ} \quad (I.23)$$

в) продольное омывание пучка труб ( $Re = 5 \cdot 10^3 \dots 10^6$ ) -

$$\alpha_{1j} = \left[ 0,021 \cdot Re_{1j}^{0,8} \cdot Pr_{1j}^{0,43} \left( \frac{Pr_{1j}}{Pr_{1w}} \right)^{0,25} \left( \frac{S}{d_1} \right)^{0,36} \right] \frac{\lambda_{1j}}{Dr_{1j}}; \quad (I.24)$$

г) переходный режим течения  $Re = 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$  -

$$\alpha_{1j} = \left[ K_{0j} \cdot Pr_{1j}^{0,43} \left( \frac{Pr_{1j}}{Pr_{1w}} \right)^{0,25} \right] \frac{\lambda_{1j}}{Dr_{1j}}; \quad (I.25)$$

где  $K_{0j} = f(Re_j)$  (см. табл. П.6).

В формулах (I.22) - (I.25) приняты следующие обозначения:

$S$  - шаг трубок в пучке, м,

$d_1, d_2$  - наружный и внутренний диаметры трубки, м,

$Re_{1j} = (w_1 D_{r1} / \nu_1)_j$  - число Рейнольдса для масла в  $j$ -й секции;

$Re_{2j} = (w_2 d_2 / \nu_2)_j$  - число Рейнольдса для воздуха в  $j$ -й секции;

$D_{rj} = 4F_{1j} / \Pi_{1j}$  - эквивалентный диаметр канала секции радиатора, м,

$F_{1j}$  - площадь живого сечения канала для протекания жидкости в  $j$ -й секции радиатора, м<sup>2</sup>;

$\Pi_{1j}$  - смоченный периметр этого живого сечения, м;

$w_{1j} = G_{1j} / \rho_{1j} F_{1j}$  - средняя скорость жидкости в  $j$ -й секции радиатора, м/с;

$G_{1j}$  - массовый расход жидкости через секцию радиатора, кг/с;

$w_2$  - скорость воздуха в трубке радиатора, м/с.

Теплофизические свойства и числа Прандтля для масла и воздуха берутся из табл. П.4 и П.5 при температурах  $T_1'$  и  $T_2'$  или  $T_1''$  и  $T_2''$ , а  $F_{T_w}$  - при  $T_w \approx (T_1' + T_2')/2$ .

Учитывая влияние изменения температуры теплоносителей на теплопередачу, коэффициент теплопередачи для каждой секции определяем следующим образом: в первом приближении - с использованием формул (I.21) - (I.25) по значениям температур теплоносителей на входе в  $j$ -ю секцию  $T_{1j}'$  и  $T_{2j}'$ .

По известным значениям  $K_j^I, W_{1j}, W_{2j}, T_{1j}'$  и  $T_{2j}'$  проводим прикидочный поверочный расчет и определяем ориентировочные значения температур теплоносителей на выходе из  $j$ -й секции:

$$T_{1\text{оп}j}'' = T_{1j}' - \frac{Q_{Pj}^I}{W_{1j}}, \quad (I.26)$$

$$T_{2\text{оп}j}'' = T_{2j}' + \frac{Q_{Pj}^I}{W_{2j}}, \quad (I.27)$$

где

$$Q_{Pj}^I = \frac{T_{1j}' - T_{2j}'}{\frac{1}{K_j^I \cdot F_{Pj}} + \frac{1}{2W_{1j}} + \frac{1}{2W_{2j}}}. \quad (I.28)$$

По этим выходным температурам теплоносителей с использованием формул (I.21) - (I.25) вычисляем величину коэффициента тепло-



передачи  $K_j^X$  на выходе из  $j$ -й секции. Находим в первом приближении его среднее значение для данной секции, Дж/м<sup>2</sup>·К:

$$\bar{K}_j^I = \frac{1}{2} (K_j^I + K_j^II). \quad (I.29)$$

Повторив несколько раз пересчет по формулам (I.22) - (I.28), получим ряд значений  $\bar{K}_j$ , сходящихся к определенному значению этой величины.

С использованием этого среднего значения коэффициента теплопередачи в  $j$ -й секции выполняем окончательный поверочный расчет данной секции по уточненной методике.

Определение конечной температуры теплоносителей  
в зависимости от направления их движения в секции радиатора

В данном радиаторе движение теплоносителей в нечетных секциях (1,3,5-я) осуществляется по противоточной схеме, а в четных (2,4-я) - по прямоточной.

С л у ч а й п р о т и в о т о к а

Изменение температуры горячего теплоносителя в  $j$ -й секции равно

$$\delta T_{1j} = T'_{1j} - T''_{1j} = (T'_{1j} - T'_{2j}) \frac{1 - e^{-\left(1 - \frac{w_{1j}}{w_{2j}}\right) \frac{\bar{K}_j F_{Pj}}{w_{1j}}}}{1 - \frac{w_{1j}}{w_{2j}} e^{-\left(1 - \frac{w_{1j}}{w_{2j}}\right) \frac{\bar{K}_j F_{Pj}}{w_{1j}}}} = (T'_{1j} - T'_{2j}) z_j, \quad (I.30)$$

а холодного -

$$\delta T_{2j} = T''_{2j} - T'_{2j} = (T'_{1j} - T'_{2j}) \frac{w_{1j}}{w_{2j}} z_j. \quad (I.31)$$

Из формул (I.30) - (I.31) получаем значения конечной температуры горячего и холодного теплоносителей:

$$T''_{1j} = T'_{1j} - \delta T_{1j}, \quad (I.32)$$

$$T''_{2j} = T'_{2j} + \delta T_{2j}. \quad (I.33)$$

С л у ч а й п р я м о т о к а

Изменение температуры горячего и холодного теплоносителей

в  $j$ -й секции равно

$$\delta T_{1j} = T'_{1j} - T''_{1j} = (T'_{1j} - T'_{2j}) \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{W_{1j}}{W_{2j}}\right) \frac{K_{1j} F_{1j}}{W_{1j}}}}{1 + \frac{W_{1j}}{W_{2j}}} = (T'_{1j} - T'_{2j}) \Pi_j, \quad (I.34)$$

$$\delta T_{2j} = T''_{2j} - T'_{2j} = (T'_{1j} - T'_{2j}) \frac{W_{1j}}{W_{2j}} \cdot \Pi_j. \quad (I.35)$$

Следовательно, по формулам (I.34), (I.35) получаем величину конечной температуры обоих теплоносителей в случае прямой секции:

$$T''_{1j} = T'_{1j} - \delta T_{1j}. \quad (I.36)$$

$$T''_{2j} = T'_{2j} + \delta T_{2j}. \quad (I.37)$$

#### Определение количества переданного тепла

Теплосъем в  $j$ -й секции определяется по соотношению, Дж/с:

$$Q_{pj} = W_{1j} \delta T_{1j} = W_{2j} \delta T_{2j}. \quad (I.38)$$

Суммарный теплосъем данного теплообменника в целом будет равен Дж,

$$Q_p = \sum_{j=1}^5 Q_{pj}. \quad (I.39)$$

#### Сравнение расчетных и опытных результатов

Следует сопоставить расчетные и опытные значения конечных температур обоих теплоносителей и суммарного теплосъема масляно-воздушного радиатора, оценить расхождения и сделать аргументированное заключение по всей работе.

## Лабораторная работа № 2

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКУПЕРАТОРА

Введение

Широко используемые в различных областях техники и технологии рекуперативные теплообменники обычно работают в заданном стационарном режиме. Поэтому применительно к этому режиму теплообменник проектируют или подбирают из числа серийно выпускаемых промышленностью. При этом стремятся создать или подобрать такой теплообменник, чтобы заданный режим его работы являлся оптимальным.

Однако теплообменники, входящие в состав транспортных энергетических установок, которые по своему прямому назначению являются многорегимными, должны удовлетворительно работать на всех эксплуатационных режимах. Поэтому для каждого вновь спроектированного или выбранного теплообменника необходимо иметь характеристики для всего диапазона рабочих режимов.

Параметрической характеристикой теплообменника называется зависимость количественной меры целевого эффекта (теплосъем, подогрев теплоносителей, потребляемая мощность для циркуляции теплоносителей и т.п.) данного устройства от величины режимного параметра (массовый расход теплоносителей, их начальная температура, давление и т.п.).

Применяются также обобщенные характеристики, связывающие обычно безразмерную величину (или даже комплекс) меры целевого эффекта с безразмерными комплексами режимных параметров. В качестве безразмерного комплекса меры целевого эффекта часто используют:

– критерий Кирпичева

$$E_0 = Q_p / N_{\Sigma} \quad (2.1)$$

где  $Q_p$  – суммарный теплосъем, Дж/с;  $N_{\Sigma}$  – суммарная потребляемая мощность для обеспечения циркуляцией обоих теплоносителей, Вт;

– КПД теплообменника

$$\eta_{\text{ТОА}} = \frac{Q_p}{Q_{\text{рас}}} \quad (2.2)$$

равный отношению фактического теплосъема к располагаемой теплоте горячего теплоносителя

$$Q_{\text{рас}} = Q_p + Q_{\text{нб}} + Q_{\text{по}}, \quad (2.3)$$

где  $Q_{\text{нб}} = G_1 C_{p1} (T_1'' - T_1^{(0)})$  — неиспользованная часть теплоты горячей жидкости на выходе из теплообменника, Дж/с;  $Q_{\text{по}}$  — потеря теплоты горячего теплоносителя в окружающую среду из-за несовершенства теплоизоляции теплообменника, Дж/с;  $T_1^{(0)}$  — температура окружающей среды (иногда — начальная температура холодного теплоносителя), К;

— относительный подогрев холодного теплоносителя

$$\vartheta = \delta T_2 / \Delta T', \quad (2.4)$$

где  $\delta T_2 = T_2'' - T_2'$  — приращение температуры холодного теплоносителя в теплообменнике, К;  $\Delta T' = T_1' - T_2'$  — температурный напор на входе в теплообменник, К.

В качестве безразмерных комплексов режимных параметров используют:

— соотношение водяных эквивалентов теплоносителей

$$W_1 / W_2 = C_{p1} G_1 / (C_{p2} G_2); \quad (2.5)$$

— соотношение

$$\bar{K} F_p / W_1 = \frac{\delta T_1}{\Delta T_1}, \quad (2.6)$$

характеризующее реализуемое количество передаваемой теплоты, приходящееся на единицу среднего температурного напора;

— отношение располагаемого перепада энтальпии к начальной величине энтальпии холодного теплоносителя

$$\frac{G_1 C_{p1} T_1' - G_2 C_{p2} T_2'}{G_2 C_{p2} T_2'} = \frac{W_1}{W_2} \frac{T_1'}{T_2'} - 1, \quad (2.7)$$

или просто безразмерный комплекс

$$\frac{W_1 T_1'}{W_2 T_2'} \quad (2.8)$$

### Цель работы

В процессе работы студенты приобретают навыки построения экспериментальных статических характеристик рекуператоров, а также учатся оценивать влияние режимных факторов рабочего процесса рекуператора на его целевые эффекты.

Для этого необходимо:

- 1) предварительно проработать соответствующий раздел лекционного курса;
  - 2) ознакомиться с устройством стенда, средствами измерения необходимых величин, методикой проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных;
  - 3) на 4 - 5 установившихся режимах путем последовательного изменения одного из режимных параметров измерить требуемые экспериментальные данные в соответствии с табл. П.2 и обработать их по приведенной в пособии методике;
  - 4) построить параметрические характеристики радиатора;
  - 5) проанализировать влияние режимных факторов на изменение величины целевых эффектов рабочего процесса данного радиатора;
  - 6) построить обобщенную характеристику
- $$E_0 = E_0 \left( \frac{W_1 T_1'}{W_2 T_2'} \right); \quad (2.9)$$
- 7) сформулировать выводы по работе.

### Порядок проведения экспериментов

За полчаса до начала эксперимента на контактном термометре термостата устанавливают первоначальную температуру подогрева масла ( $50^{\circ}\text{C}$ ) и включают подогреватели масла: в термостате - тумблером на пульте термостата, в маслоблоке - на пульте стенда вилкой в розетку. После этого подключают установку к сети с помощью крайнего левого тумблера на пульте стенда. При этом на пульте термостата должна загореться сигнальная лампочка. После достижения заданной температуры масла подогреватель в термостате автоматически отключается и лампочка гаснет.

Полностью открывают заслонку вентилятора подачи воздуха

19. кран подачи масла к насосу 17 и игольчатый кран подачи масла в теплообменник 5. С помощью кнопочных выключателей на пульте стенда запускают вентилятор 19 и маслонасос 4.

Дальнейшие действия зависят от вида снимаемой температурной характеристики.

$$\text{Зависимость } Q_{0п} = Q_{0п}(G_2)$$

1. На термометре термостата установить температуру масла в пределах  $30 \dots 60^\circ\text{C}$ .

2. С помощью игольчатого крана 5 установить определенный расход масла через теплообменник. Расход фиксируется по перепаду давления на манометре 13.

3. Через 10...15 мин зафиксировать выход теплообменника на стационарный режим работы, о чем свидетельствует неизменность показаний термопар 9, 10, 26, 27 во времени.

4. Снять показания манометров 8, 13, 24, 25 и 30 и показания термопар 9, 10, 26, 27 на милливольтметре, соответствующих точкам I - VII на переключателе термопар.

5. Измерить температуру  $t_0$  и давление  $P_0$  окружающей среды. Все данные занести в табл. П.2 в первую строку (I-й режим).

6. Повторить операции I - 5 при пяти-шести различных положениях заслонки вентилятора 19.

7. Проведя соответствующие расчеты, построить характеристику теплообменника

$$Q_{0п} = Q_{0п}(G_2).$$

8. Изменив несколько раз температуру масла по термометру термостата и проведя для каждой температуры масла все описанные выше действия, получить семейство характеристик  $Q_{0п} = Q_{0п}(G_2)$  для ряда начальных значений температуры масла при фиксированном значении расхода масла  $G_1$ .

9. Изменив несколько раз расход масла с помощью игольчатого крана 5 и проведя для каждого его положения все указанные по п. I - 5 действия, получить семейство характеристик  $Q_{0п} = Q_{0п}(G_2)$  для ряда значений массового расхода масла через теплообменник при фиксированном значении температуры масла на входе в теплообменник.

Зависимость  $Q_{оп} = Q_{оп}(T_1')$

1. Установить с помощью регулятора температуры на термометре термостата определенную (ближе к минимальной) температуру масла в термостате (30...60°C).

2. Установить с помощью крана 5 определенный (ближе к минимальному) расход масла через теплообменник, фиксируемый по перепаду давления на манометре 13.

3. Установить с помощью заслонки вентилятора 19 определенный (ближе к максимальному) расход воздуха, фиксируемый по перепаду давления на манометре 24.

4. Через 10...15 мин зафиксировать выход теплообменника на стационарный режим работы, о чем свидетельствует неизменность во времени показаний термомпар 9, 10, 26, 27.

5. Снять показания манометров 8, 13, 24, 25 и 30 и показания термомпар 9, 10, 26, 27 на милливольтметре, соответствующих точкам 1 - 7 на переключателе термомпар, и занести их в табл. П.2.

6. Повторить операции 1-5 при пяти-шести различных положениях регулятора на термометре термостата (в диапазоне 30...60°), т.е. при различных значениях температуры масла.

7. Проведя соответствующие расчеты, построить характеристику теплообменника  $Q_{оп} = Q_{оп}(T_1')$ .

8. Изменить с помощью заслонки вентилятора 19 величину расхода воздуха и проведя для каждого ее положения все описанные в п. 1 - 5 действия, получить семейство характеристик

$Q_{оп} = Q_{оп}(T_1')$  для ряда значений величины расхода воздуха через теплообменник при фиксированном значении расхода масла. Изменив несколько раз расход масла с помощью крана 5 и проведя для каждого его положения все указанные действия, получить семейство характеристик  $Q_{оп} = Q_{оп}(T_1')$  для ряда значений расхода масла при фиксированном значении расхода воздуха.

Зависимость  $Q_{оп} = Q_{оп}(G_1)$

1. Установить с помощью крана 5 определенный (ближе к минимальному) расход масла через теплообменник, фиксируемый по перепаду давления на манометре 13.

2. Установить с помощью заслонки вентилятора 19 деленный расход воздуха, фиксируемый по перепаду давления на манометре 24.

3. С помощью регулятора температуры на термометре термостата установить определенную (ближе к минимальной) температуру масла в термостате ( $30 \dots 60^\circ\text{C}$ ).

4. Через 10...15 мин зафиксировать выход теплообменника на стационарный режим работы, о чем свидетельствует неизменность показаний термопар 9, 10, 26, 27 во времени.

5. Снять показания манометров 3, 13, 24, 25 и 30 и показания термопар 9, 10, 26, 27 на милливольтметре, соответствующих точкам 1 - 7 на переключателе термопар, и занести их в табл. П.2.

6. Повторить операции по п. 1-5 при пяти-шести различных положениях крана 5.

7. Проведя соответствующие расчеты, построить характеристику теплообменника

$$Q_{0n} = Q_{0n}(G_1).$$

8. Изменив несколько раз значение температуры масла по термометру термостата и проведя для каждой температуры масла описанные в п. 1-5 действия, получить семейство характеристик  $Q_{0n} = Q_{0n}(G_1)$  для ряда значений температуры масла при фиксированном значении  $G_2$ . Меняя несколько раз значения расхода воздуха с помощью заслонки вентилятора 19 при неизменной начальной температуре масла и проведя для каждого ее положения все описанные действия, получить семейство характеристик

$Q_{0n} = Q_{0n}(G_1)$  для ряда значений расхода воздуха через теплообменник при фиксированном значении температуры масла на его входе.

#### Обработка экспериментальных данных и построение параметрических характеристик

Для построения параметрических характеристик данного рекуператора прежде всего необходимо перевести приборные значения величин (см. табл. П.2) в стандартные физические величины в соответствии с системой СИ, а затем вычислить расход теплоносителей, теплосъем и затраченную мощность для прокачки тепло-



носителей по методике, приведенной в описании предыдущей лабораторной работы. Результаты занести в табл. П.2.

По данным табл. П.2 построить параметрические характеристики вида

$$\begin{aligned} \text{а) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_1) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_1) \text{ при } G_2 = \text{idem } T_1' = \text{idem}; \\ \text{б) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_1, T_1') \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_1, T_1') \text{ при } G_2 = \text{idem}; \\ \text{в) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_1, G_2) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_1, G_2) \text{ при } T_1' = \text{idem}; \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{а) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_2) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_2) \text{ при } G_1 = \text{idem } \text{ и } T_1' = \text{idem}; \\ \text{б) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_2, T_1') \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_2, T_1') \text{ при } G_1 = \text{idem}; \\ \text{в) } Q_{оп} &= Q_{оп}(G_2, G_1) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(G_2, G_1) \text{ при } T_1' = \text{idem}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{а) } Q_{оп} &= Q_{оп}(T_1') \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(T_1') \text{ при } G_1 = \text{idem } \text{ и } G_2 = \text{idem}; \\ \text{б) } Q_{оп} &= Q_{оп}(T_1', G_1) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(T_1', G_1) \text{ при } G_2 = \text{idem}; \\ \text{в) } Q_{оп} &= Q_{оп}(T_1', G_2) \text{ и } N_{\Sigma} = N_{\Sigma}(T_1', G_2) \text{ при } G_1 = \text{idem}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

а также обобщенную статическую характеристику исследуемого масляно-воздушного радиатора вида

$$E_0 = E_0 \left( \frac{W_1 \cdot T_1'}{W_2 \cdot T_2'} \right). \quad (2.13)$$

Какие из приведенных характеристик входят в индивидуальное задание каждого из студентов по данной лабораторной работе, устанавливает преподаватель, проводящий занятие.

Используя обработанные опытные данные, формируют блок входных величин для расчета параметрических характеристик теплообменника на ЭВМ. Порядок расчета этих характеристик приведен в работе [5]. Программа расчета сформирована и адаптирована для ЭВМ MEPA и введена в ее память под именем РЕЦЕПЕ.

Исходные данные для ввода в машину формируются в следующем виде:

$$\begin{aligned} N1 &= 5, G1 = G_1, G2 = G_2, P1 = 100000; P2 = \Delta P_{\text{ст}} + P_0, \\ T1 &= T_1, T2 = T_2', D3 = [d_2] = 3.60000E-03, D4 = [d_1] = 4.20000E-03, \\ L0 &= [\lambda] = 390, D0 = 0.245, L = 0.25, R = 287, R2 = \\ &= [\rho_1] = 850, C2 = [C_{p1}] = 2000, \eta_9 = .01, R0 = .1, B = 180, \\ H &= .01, E = 1.00000E-04, H1 = .05, \\ N2(1) &= 263, N2(2) = 399, N2(3) = 432, N2(4) = 409, \\ N2(5) &= 254, \\ 1.80000E-05, & 0, 0, 0.11, 0, 0, 0.26, 0, 0, .1, 0, 0, \\ 1010, & 0, 0. \end{aligned}$$

Эти данные вводят в ЭВМ и получают расчетные значения величин, необходимых для построения характеристик теплообменника. Для удобства последующего анализа расчетные характеристики строят на тех же планшетах, что и опытные.

В процессе работы необходимо сравнить экспериментальные и расчетные характеристики теплообменника, проанализировать влияние режимных факторов на тепловыдел  $Q_{\Sigma \text{оп}}$  и  $Q_{\Sigma \text{расч}}$  и затраты мощности  $N_{\Sigma \text{оп}}$  и  $N_{\Sigma \text{расч}}$  на прокачку теплоносителей через теплообменник, а также сформулировать основные выводы по данной работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Основные данные радиатора

Секция П	1	2	3	4	5	Собщее
Параметр						
Число трубок в секции $t$	263	399	432	409	254	1757
Площадь проходного сечения для воздуха $S_B, \text{ м}^2$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$4,17 \cdot 10^{-3}$	$2,59 \cdot 10^{-3}$	$17,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Площадь проходного сечения для масла $S_M, \text{ м}^2$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$4,13 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$16,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
Площадь теплообмена по маслу $F_M = \pi d_1 [l-l'] t, \text{ м}^2$	0,81	1,23	1,33	1,26	0,782	5,43
Площадь теплообмена по воздуху $F_B = \pi d_2 l t, \text{ м}^2$	0,743	1,13	1,22	1,15	0,716	4,96



Таблица П.3

Градуировочная таблица  $e = f(Q)$  для хромель-никелевых термопар

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,96	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41

Таблица П.4

Физические свойства трансформаторного масла  
при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$C_p,$ кДж/кг·град	$\lambda,$ Вт/м·град	$\mu \cdot 10^3,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$Pr$
0	891	1,62	0,112	55,24	67,45	857
10	885	1,65	0,111	33,45	37,80	495
20	879	1,71	0,111	21,10	24,00	326
30	873	1,78	0,110	13,44	15,40	218
40	867	1,83	0,109	9,364	10,80	157
50	860	1,87	0,108	6,708	7,80	116
60	854	1,91	0,108	5,338	6,25	95
70	848	1,94	0,107	4,070	4,8	74

Таблица П.5

Физические свойства сухого воздуха при  $B = 760$  мм рт.ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$C_p,$ кДж/кг·град	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/м·гр.	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$Pr$
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,73	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,5	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,96	0,696

Таблица П.6

Значение функции  $K_0 = f(Re)$  при  $Re = 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	3,6	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Таблица П.7

Значение функции  $K_0 = f(Re)$  при  $Re = 2 \cdot 10^3 \dots 10^4$

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	3,6	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Список использованной литературы

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., 1973.  
Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М., 1978.
3. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.-Л., 1959.
4. Баргафтик П.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1963.
5. Фролов С.Д., Иваненко Н.И., Блишков В.Н. Расчет статических характеристик рекуперативного теплообменника. Харьков, 1989.



Сергей Дмитриевич Фролов  
Валерий Владимирович Смаицер  
Евгений Николаевич Кравцов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Редактор С.П. Гевло

Ср. план 1990, поз. 52

Подписано в печать 26.01.90 БЦ 18517

Формат 60x84/1/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,8. Т. 100 экз. Заказ 44. Цена 15 к.

Харьковский авиационный институт

310191, Харьков-191, ул. Чкалова, 17

Ротапринт типографии ХАИ

310191, Харьков-191, ул. Чкалова, 17