

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Исследование рабочего процесса регенеративного теплообменника**

САМАРА 2014

УДК 621.036.7

Составители: Довгялло А. И.  
Угланов Д. А.  
Горшкалёв А. А.

**Исследование рабочего процесса регенеративного теплообменника** [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работе / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост Довгялло А. И. Угланов Д. А. Горшкалёв А. А.; - Электрон. текстовые и граф. дан. (2 Мбайт). - Самара, 2014. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

В электронных методических указаниях показана методика экспериментального исследования частных задач теплопередачи и рассмотрены вопросы теплопередачи.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет 2014

**Цель работы:** изучение методики и приобретения навыков экспериментального исследования частных задач теплопередачи, углубления знаний по вопросам теплопередачи.

### **Задание**

Провести эксперимент, снять рабочие поле температур, определить коэффициент полезного действия теплообменника.

Составить отчет о выполненной работе.

### **Теоретические основы эксперимента**

Регенеративные теплообменники относятся к поверхностным аппаратам: их эффективность зависит от поверхности теплообмена. Насадки – это теплообменники, в которых происходит периодическое аккумулирование тепловой энергии в насадке и возвращение ее рабочему теплоносителю. Время, за которое тепло передается от горячего теплоносителя насадке регенератора называется временем прямого или горячего дутья  $\tau_{г.д.}$ . Время, за которое тепло от насадки регенератора передается холодному теплоносителю называется временем обратного или холодного дутья.

Принцип работы регенератора может быть пояснен с помощью диаграммы изменения температур насадки рабочего газа по длине аппарата, представленной на рисунке 1.

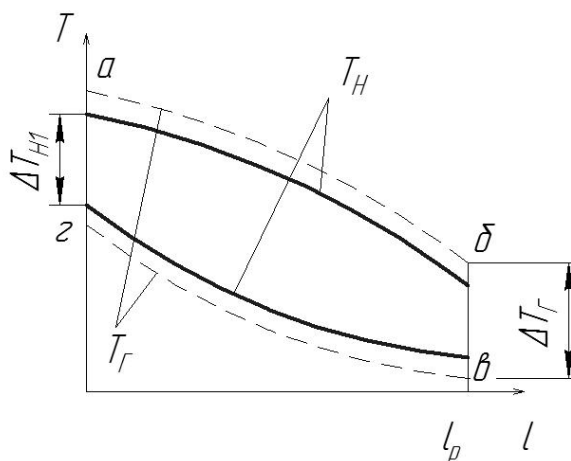


Рисунок 1 - Диаграмма изменения температур

Рабочий газ входит в регенератор в термодинамическом состоянии «а», передает свою избыточную тепловую энергию материалу насадки и выходит из регенератора в состоянии «б».

В течение этого процесса (прямого дутья) температура каждого элемента насадки повышается. Далее через регенератор в обратном направлении пропускается такой же, но холодный газ, в состоянии «в». Он отбирает теплоту, аккумулированную насадкой при теплом дутье. При этом температура каждого элемента насадки регенератора снижается, а рабочий газ после холодного дутья исходит из аппарата в состоянии «г».

В идеальном случае регенерации теплоты в аппарате должно соблюдаться постоянство градиента температуры вдоль регенератора и разности температур между насадкой и газом при различных направлениях дутья, также, как и колебания температур каждого элемента насадки должны составлять бесконечно малые величины. В реальном регенераторе выполнение этих требований невозможно. Процесс регенерации будет обратимым в том случае, если в любой момент времени достигается термодинамическое равновесие, т.е. в этом случае процесс теплообмена должен протекать бесконечно медленно.

При конечной разности температур между насадкой и рабочим газом некоторой компенсации необратимости можно было бы добиться за счет увеличения коэффициента теплоотдачи. Однако на практике это условие возможно при увеличении массовой скорости потока, что приводит к возрастанию гидравлического сопротивления насадки, что за собой влечет увеличение мощности на прокачку теплоносителя. Если регенеративный теплообменник является элементом технологического процесса (металлургическая, теплоэнергетическая промышленность), то это приведет к увеличению энергопотребления оборудования. При работе регенератора в составе двигателей внешнего подвода теплоты (двигатели Стирлинга) или холодильных машин гидравлические сопротивления снижают индикаторную мощность двигателя, его КПД, увеличивают работу цикла холодильной

машины, уменьшая и холодопроизводительность.

Поэтому исследование работы регенеративного теплообменника, оценке его эффективности посвящена данная лабораторная работа. Эффективность регенератора оценивается с помощью КПД:

$$\eta_p = \frac{Q_p}{Q_{ид.}} \quad (1)$$

где  $Q_p$  - тепло аккумуляирования насадкой реального регенератора или количество теплоты передаваемой в единицу времени

$Q_{ид.}$  - тепло, аккумуляированное насадкой идеального регенератора в рабочем интервале температур  $T_2$ ,  $T_x$ , или количество теплоты, передаваемой в единицу времени от газа к насадке регенератор и от насадки к газу в идеальном случае

$$Q_p = Q_{ид.} - \Delta Q_n$$

$\Delta Q_n$  - потери от недорекуперации в регенераторе.

В первом приближении можно считать, что  $Q_p = C_p \cdot G_{\Gamma} (T_{ex} - T_{вых})$  где  $C_p$  - изобарная теплоемкость теплоносителя, выбранная по справочным данным по температуре среднего сечения регенератора. Пренебрегая нелинейностью распределения температуры можно принять,

$$\text{что } T_{cp} = \frac{T_{ex} + T_{вых}}{2}$$

$$Q_{ид.} = Q_{ид} = C_p \cdot G_{\Gamma} (T_{ex} - T_{н0}) \quad (3)$$

в котором  $T_{н0}$  - средневзвешенная температура насадки регенератора в начальный момент времени. В случае с идеальным регенератором теплоноситель на выходе приобретает температуру равную температуре регенератора в начальный момент времени. Таким образом, коэффициент полезного действия может быть определен, как функция температур теплоносителя и насадки:

$$\eta_p = \frac{T_{\text{ex}} - T_{\text{вых}}}{T_{\text{ex}} - T_{\text{н0}}}$$

или  $\eta_p = \frac{1-\tau}{1-\theta}$  (5) в котором  $\tau = \frac{T_{\text{вых}}}{T_{\text{ex}}}$ ,  $\theta = \frac{T_{\text{н0}}}{T_{\text{ex}}}$

Важной характеристикой регенератора является аккумулируемое насадкой тепло  $Q_n$ . Его величина зависит от времени прямого дутья и расхода теплоносителя. Уровень  $Q_n$  может быть оценен из выражения

$$Q_n = \frac{c_n \cdot m_n \cdot \Delta T_n}{\tau_g}$$

Здесь  $c_n, m_n$  - теплоемкость и масса насадки регенератора,  $\Delta T_n$  - средневзвешенная амплитуда колебания температуры насадки.

Знание величины  $Q_n$  позволяет найти осредненный по времени коэффициент теплоотдачи от газа к насадке. Согласно закону сохранения энергии количество аккумулированного в единицу времени тепла элементарным объемом насадки регенератора равно количеству тепла, полученному от газа через поверхность теплообмена насадки  $F_n$ .

$$\begin{aligned} Q_{ni} = Q_{\Gamma_i} &= \alpha_i \cdot F_{ni} \cdot (T_{\Gamma_i} - T_{ni}) \\ \frac{c_n \cdot m_n \cdot \Delta T_{ni}}{\tau_g} &= \alpha_i \cdot F_{ni} \cdot \Delta T_i \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда  $\alpha_i$  - локальный коэффициент теплоотдачи будет равен

$$\alpha_i = \frac{c_n \cdot m_n \cdot \Delta T_{ni}}{\tau_g \cdot F_{ni} \cdot \Delta T_i} \quad (8)$$

Осредненный по всей поверхности регенератора коэффициент теплоотдачи определится суммированием по всем элементарным участкам

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_n \cdot m_n \cdot \Delta T_{ni}}{\tau_g \cdot F_{ni} \cdot \Delta T_i}, \quad (9)$$

где  $n$  - количество участков.

С учетом итого количество теплоты, подводимой к насадке регенератора может быть найдено следующим образом:

$$Q_n = \bar{\alpha} \cdot F_n \cdot \Delta T_n = C_{pГ} \cdot G_{Г} \cdot (T_{вх} - T_{вх}) \cdot \tau_g \quad (10)$$

или здесь  $\Delta T_n$  - среднелогарифмический температурный напор между теплоносителем и насадкой:

В выражение (II) величина  $\frac{\bar{\alpha} \cdot F_n}{G_{Г} \cdot C_{pГ}} = NTU$  - количество единиц

переноса теплоты регенератором - одна из его важнейших характеристик. С ее помощью может быть рассчитан КНД регенератора.

$$\eta_p = \frac{NTU}{NTU + 1} \left[ 1 - \frac{1}{g \left( \frac{W_H}{W_{Г}} \right)^2} \right]$$

Здесь  $W_H = c_n \cdot m_n$  - теплоемкость насадки.  $W_{Г} = C_p \cdot M_{Г}$  - теплоемкость газа;  $M_{Г}$  - масса газа, прошедшего через среднее сечение регенератора за время прямого или обратного дутья.

Отличие в значениях  $\eta_p$  найденного по (14) и (4) не должно превышать 5%.

### Описание лабораторной установки и методика эксперимента

Схема установки изображена на рисунке 2. Она включает в себя регенератор (1) и контрольно-измерительную аппаратуру. Регенеративный теплообменник состоит из корпуса (1) и насадки регенератора (2). Корпус - полый цилиндр, выполненный из материала с низкой теплопроводностью (текстолита). Насадка регенератора представляет собой набивку из сетки № 01 фосфористой бронзы ГОСТ6813-73. Пористость сетки  $\varepsilon = 0,7$ , теплоемкость  $C_n = 420 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ , диаметр проволоки  $d_{np} = 0,06 мм$ , удельная поверхность теплообмена насадки  $S_0 = 19670 \frac{м^2}{м^3}$ , эквивалентная масса  $Im^2 - M_n = 0,31 кг$ .

Весь регенератор по длине разбит на 5 участков. Масса насадки регенератора строго фиксирована и равна  $m_n$ .

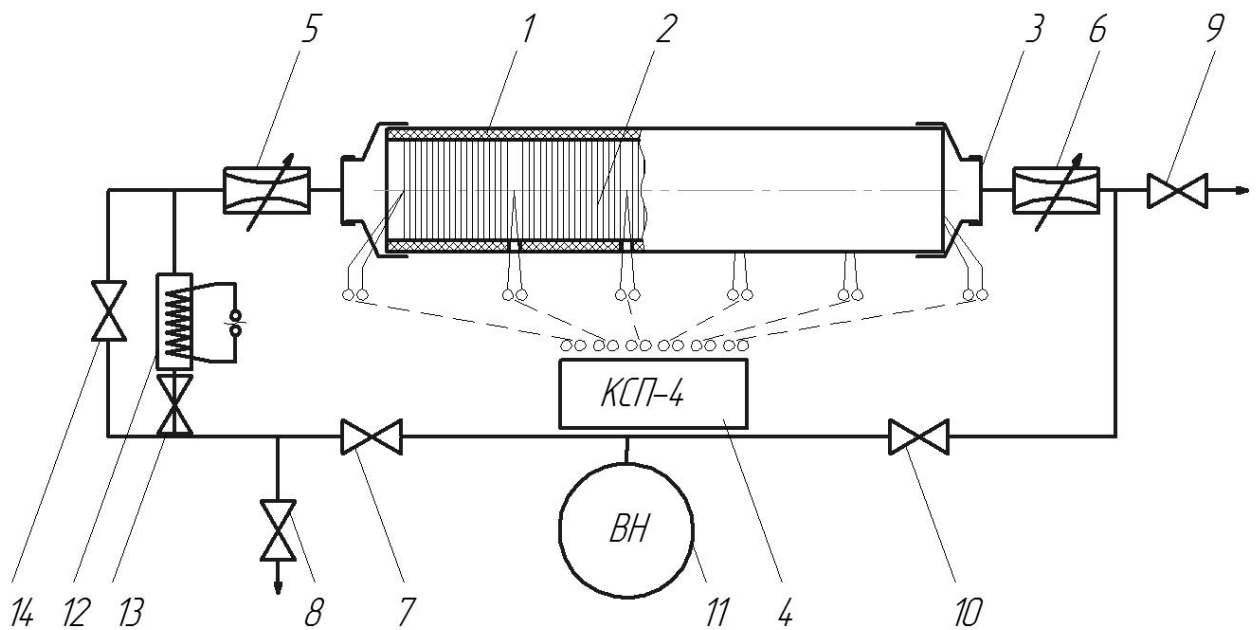


Рисунок 2 - Схема установки

На входе и выходе в каждый элемент насадки устанавливаются 2 хромель-копелевые термопары. Одна из термопар крепится к сетке и фиксирует ее температуру  $T_n$ , вторая измеряет температуру газа  $T_g$ . Термопара выполнена из проволоки  $d = 0,5 \text{ мм}$ . Горячий спай термопар через сверления  $d = 1,5 \text{ мм}$  в корпусе введен до центра регенератора. Расстояние между элементами насадки регенератора составляет 1-1,5 мм.

Холодный спай помещен в термостатирующую коробочку при температуре окружающей среды. Показания термопар выводятся на КСП-4. Точность измерения температуры образцов составляет  $0,1^\circ\text{C}$ . Расстояние между термопарами равно.

Через крышки регенератора 3 и 4 подводится воздух, который попеременно продувается через регенератор в прямом и обратном направлении. Расход воздуха измеряется с помощью расходомерных шайб (5,6), установленных по торцам регенератора. Падение давления измеряется с помощью пьезометра.

Время прямого и обратного дутья фиксируется электронным секундомером. Для прокачки воздуха используется вакуумнасос(II).



Количество прокачиваемого воздуха регулируется вентилями 7,8,9,10. Для подогрева воздуха при прямом дутье в подводящем патрубке установлен подогреватель (12), который питается через автотрансформатор (13) стабилизированным напряжением. Для реверса воздуха в регенераторе в установке предусмотрены вентили. При переключении их воздух поступает через другой конец регенератора, минуя подогреватель. Совершается процесс обратного дутья.

### **Порядок выполнения работы.**

#### **Обработка результатов экспериментов.**

После ознакомления со схемой опытной установки необходимо проверить правильность включения измерительных приборов и затем приступить к проведению опытов.

Вентили 8 и 10 должны быть закрыты, вентили 7 и 9 открыты. Замерить температуру поверхности насадки регенератора на КСП-4. Включить вакуумнасос. Подать на нагреватель электрическую мощность. Включить секундомер. Произвести замеры:

$\Delta h$  - показания пьезометра;

$G_G$  - расход газа;

$\tau$  - время прямого и обратного дутья;

$T_{Гвх}, T_{Гвых}$  - температуру газа на входе и выходе из регенератора;

$T_{Гвх}, T_{Гвых}$  - температуру газа на входе и выходе в элементарные участки регенератора в точках;

$\Delta T_H$  - амплитуду колебания температуры насадки;

$t_e$  , - температура окружающей среды;

$B$  - барометрическое давление, мм.рт.ст.

Принять время прямого и обратного дутья одинаковым и равным 10 мин. По замеренным величинам  $G_G, T_{Гвх}, T_{Гвых}, T_{H0}$  можно по (2) и (3) рассчитать количество теплоты, которое может быть передано идеальному и реальному

