

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
РЕГЕНЕРАТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕННИКА**

САМАРА 1995

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
РЕГЕНЕРАТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕННИКА

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА 1995

Исследование рабочего процесса регенеративного теплообменника: Метод. указания к лабораторной работе / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. В. Н. Белозерцев, В. В. Бирюк, А. И. Довгялло. Самара, 1995. 12 с.

Представлена теория работы регенеративного теплообменника, описан экспериментальный стенд, порядок проведения опытов. Приведена последовательность снятия рабочих характеристик регенератора и оценена его эффективность.

Предназначены для студентов 1, 2, 3, 4-го факультетов дневного и вечернего отделений. Подготовлены на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева.

Рецензент В. Н. М а т в е е в

Цель работы: изучение методики и приобретение навыков экспериментального исследования частных задач теплопередачи, углубление знаний по вопросам теплопередачи.

Задание:

1. Провести эксперимент, снять рабочее поле температур, определить коэффициент полезного действия теплообменника.
2. Составить отчет о выполненной работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Регенеративные теплообменники относятся к поверхностным аппаратам: их эффективность зависит от поверхности теплообменника, 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 τ . 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 и рабочего газа по длине аппарата, представленной на рис. 1. 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

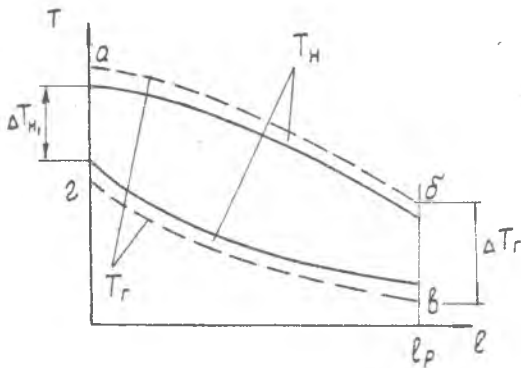


Рис. 1. Упрощенная диаграмма распределения температуры газа и насадки регенератора

градиента температуры вдоль регенератора и разности температур между насадкой и газом при различных направлениях дутья так же, 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 влечет за собой увеличение мощности на прокачку теплоносителя. Если регенеративный теплообменник является элементом технологического процесса (металлургическая, теплотехническая 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 холодопроизводительность.

состоянии "в". Он отбирает теплоту, аккумулированную насадкой при теплом дутье. При этом температура каждого элемента насадки регенератора снижается, а рабочий газ после холодного дутья выходит из аппарата в состоянии "г".

В идеальном случае регенерации теплоты в аппарате должно соблюдаться постоянство

Поэтому исследованию 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_r, T_x , или количество теплоты, передаваемой в единицу времени от газа к насадке регенератора и от насадки к газу в идеальном случае:

$$Q_p = Q_{ид} - \Delta Q_H,$$

ΔQ_H — потери от недорекуперации в регенераторе.

В первом приближении можно считать, что

$$Q_p = c_p G (T_{вх} - T_{вых}), \quad (2)$$

где c_p — изобарная теплоемкость теплоносителя, выбранная по справочным данным по температуре среднего сечения регенератора.

Пренебрегая нелинейностью распределения температуры,

можно принять, что $T_{ср} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2}$,

$$Q_{ид} = c_p G (T_{вх} - T_{но}), \quad (3)$$

в котором $T_{но}$ — 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:

$$\eta_p = \frac{T_{вх} - T_{вых}}{T_{вх} - T_{но}} \quad (4)$$

$$\text{или } \eta_p = \frac{1 - \tau}{1 - \theta}, \quad (5)$$

$$\text{в котором } \tau = \frac{T_{\text{вых}}}{T_{\text{вх}}}; \quad \theta = \frac{T_{\text{но}}}{T_{\text{вх}}}.$$

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

$$Q_H = \frac{c_H m_H \Delta T_H}{\tau}.$$

Здесь c_H, m_H — теплоемкость и масса насадки регенератора, ΔT_H — средневзвешенная амплитуда колебания температуры насадки.

Знание величины Q_H 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_{Hi} :

$$Q_{Hi} = Q_{Gi} = \alpha_i F_{Hi} (T_{Gi} - T_{Hi}),$$

$$\frac{c_H m_H \Delta T_{Hi}}{\tau} = \alpha_i F_{Hi} \Delta T_i.$$

Отсюда α_i — локальный коэффициент теплоотдачи будет равен

$$\alpha_i = \frac{c_H m_{Hi} \Delta T_{Hi}}{F_{Hi} \Delta T_i \tau}. \quad (8)$$

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

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_H m_{Hi} \Delta T_{Hi}}{F_{Hi} \Delta T_i \tau}, \quad (9)$$

где n — количество участков.

С учетом этого количества теплоты, подводимой к насадке регенератора, может быть найдено следующим образом:

$$Q_{II} = \bar{\alpha} F_H \Delta T_H = c_p G (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}). \quad (10)$$

Здесь ΔT_H — среднелогарифмический температурный напор между теплоносителем и насадкой.

Если представить последнее соотношение в безразмерном виде

$$\frac{\bar{\alpha} F_H}{c_p G} = \frac{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}}{\Delta T_H},$$

то становится очевидным, что комплекс в левой части уравнения представляет собой количество единиц переноса тепла NTU :

$$NTU = \frac{\bar{\alpha} F_H}{c_p G}. \quad (11)$$

Это одна из важнейших характеристик теплообменника. С ее помощью может быть рассчитан КПД регенератора:

$$\eta_p = \frac{NTU}{NTU + 1} \left[1 - \frac{1}{9 \left(\frac{W_H}{W_r} \right)^2} \right]. \quad (12)$$

Здесь $W_H = c_H m_H$ — полная теплоемкость насадки; $W_r = c_p M_r$ — полная теплоемкость газа; M_r — масса газа, прошедшего через среднее сечение регенератора за время прямого или обратного дутья.

Отличие в значениях η_p , найденного по (12) и (4), не должно превышать 5%.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки изображена на рис. 2. Она включает в себя регенератор 1 и контрольно — измерительную аппаратуру. Регенеративный теплообменник состоит из корпуса 1 и насадки регенератора 2. Корпус — полый цилиндр длиной 150 мм, выпол —

ненный из материала с низкой теплопроводностью (текстолита). Насадка регенератора представляет собой набивку из сетки № 01 фосфористой бронзы ГОСТ 6813–73. Пористость сетки $\varepsilon = 0,7$, теплоемкость $c_H = 420$ Дж/(кг К), диаметр проволоки $d_{пр} = 0,06$ мм, удельная поверхность теплообменника насадки $S_0 = 19670$ м²/м³, эквивалентная масса 1 м² — $M_H = 0,31$ кг. Весь регенератор по длине разбит на 5 участков. Масса насадки регенератора строго фиксирована и равна m_H .

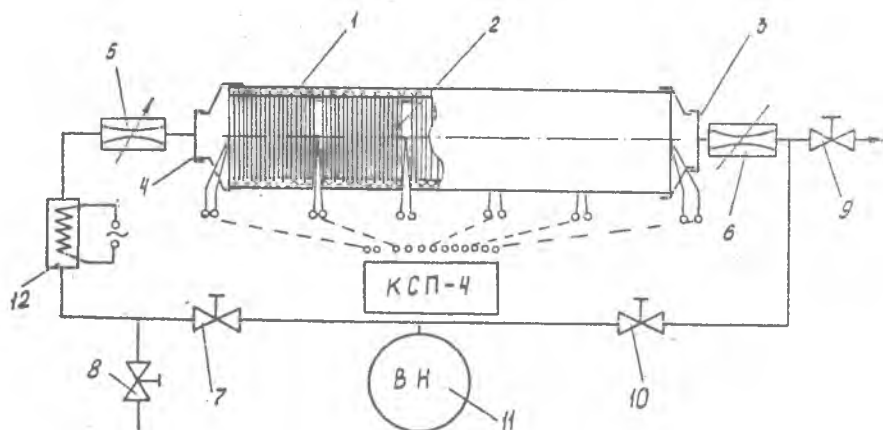


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

На входе и выходе в каждый элемент насадки устанавливаются две хромель–копелевые термопары. Одна из термопар крепится к сетке и фиксирует ее температуру T_H , вторая измеряет температуру газа T_G . Термопара выполнена из проволоки $d = 0,5$ мм. Горячий спай термопар через сверления $d = 1,5$ 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 $0,1^\circ$ С. Расстояние между термопарами равно 5 мм.

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 11. 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:

Δh — показание пьезометра;

G — расход газа;

τ — время прямого и обратного дутья;

$T_{г.вх}, T_{г.вых}$ — температуры газа на входе и выходе из регенератора;

$T_{гiвх}, T_{гiвых}$ — температуры газа на входе и выходе в элементарные участки регенератора;

ΔT_H — амплитуда колебания температуры насадки;

t_c — температура воздуха окружающей среды;

B — барометрическое давление, мм рт. ст.

Принять время прямого и обратного дутья одинаковым и равным 10 мин. По замеренным величинам G , $T_{г.вх}$, $T_{г.вых}$, $T_{но}$ можно по (2) и (3) рассчитать количество теплоты, которое может быть передано идеальному и реальному регенератору $Q_{ид}$, Q_p . Значение изобарной теплоемкости выбирается по $T_{ср}$.

По формуле (4) рассчитывается КПД регенератора, по (9) и (11) находится осредненный коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_H$ и NTU . Значение КПД по (12) сравнивается с его величиной, найденной из (4). Полученные величины заносятся в протокол.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- 1) принципиальную схему установки;
- 2) протокол наблюдений и расчет всех параметров;
- 3) график распределения температурного поля по длине регенератора при прямом и обратном дутье;
- 4) обработанные результаты опыта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Что такое регенеративный теплообменник?
2. Что такое регенерация тепла в теплообменнике?
3. Что такое КПД регенератора?
4. Прямое и обратное дутье.
5. Какой метод лежит в основе определения локальных коэффициентов теплоотдачи?
6. Объясните порядок выполнения работы.
7. Что такое NTU ?
8. Чем отличается теплообменник регенеративного типа от теплообменника регенератора?

Протокол измерений и расчетных величин

Локальные параметры		Номер термопары											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$E_{изм},$ мВ	прямое дутье												
	обратное дутье												
$E_{хс},$ мВ													
$E_{Гс} = E_{изм} + E_{хс},$ мВ													
$t, °C$													
$\alpha_{нi},$ Вт / м ² К													
$\Delta T_{ни},$ К													
Осредненные параметры		$t_{по},$ °C	$t_{вх},$ °C	$t_{вых},$ °C	$\frac{\Delta h_1}{мм.с}$	$\frac{\Delta h_2}{H_2O}$	$G,$ кг/с	$\tau, с$	$\frac{\alpha_n}{(м^2 \cdot К)}$	NTU	η_p		
Прямое дутье													
Обратное дутье													

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

Составители: *Белозерцев Виктор Николаевич*
Бирюк Владимир Васильевич
Довгялло Александр Иванович

Редактор Л. Я. Чегодаева
Техн. редактор Г. А. Усачева
Корректор Т. И. Щелокова

Подписано в печать 30.07.95. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.п.л. 0,7.
Усл.кр. — отг. 0,2. Уч. — изд.л. 0,7. Тираж 150 экз.
Заказ № 1000. Арт. С — 34/95.

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского аэрокосмического
университета. 443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.