

А.Г. Каримова<sup>1</sup>, С.Г. Дезидерьев<sup>1</sup>, В.М. Зубарев<sup>1</sup>, М.Г. Хабибуллин<sup>2</sup>

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия (1)  
ОАО «Казанькомпрессормаш», Казань, Россия (2)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПОРИСТОМ ВДУВЕ ВОЗДУХА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ГОРЯЧИХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования температурного состояния, эффективности охлаждения и процессов теплообмена при вдуве охлаждающего воздуха через пористую стенку в кольцевой (щелевой) зазор в направлении нагретой стенки при отсутствии основного сносящего потока и противодавления. Установлены зависимости по эффективности охлаждения и теплоотдаче, позволяющие прогнозировать температуру охлаждаемой пористой стенки с учетом влияния основных определяющих параметров.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации современных высокотемпературных ГТД в качестве газогенераторов для привода агрегатов перекачки энергоносителей, на электростанциях и в других наземных целях актуальным является вопрос выбора наиболее эффективного способа охлаждения для тепловой защиты окружающего пространства от горячего двигателя.

Известно, что наиболее эффективным способом [1] является проникающее пористое охлаждение.

Работа посвящена экспериментальному исследованию эффективности охлаждения и теплоотдачи от нагреваемой к охлаждаемой пористой стенке с учетом влияния различных факторов – расхода воздуха, температурного напора и др.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка рекомендаций для расчета температурного состояния наружной оболочки корпуса ГТД и ГТУ наземного применения с использованием пористого вдува в зону горячей стенки на основе экспериментального изучения эффективности охлаждения и теплоотдачи с учетом влияния определяющих факторов.

Поставленная цель достигается решением следующих задач: 1) проведением экспериментальных исследований по изучению эффективности охлаждения и теплообмена с горячей и холодной сторон пористой стенки; 2) получением зависимостей по эффективности охлаждения и по коэффициентам теплоотдачи – с горячей и холодной сторон.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Для экспериментального исследования тепловой завесы были спроектированы и изготовлены две

модельные установки. Экспериментальная установка 1 (рис.1) представляла собой кольцевые каналы, образованные тремя коаксиально расположенными относительно друг друга цилиндрами, закрытые с торцов асбоцементными дисками. Внутренний цилиндр – источник теплового потока, нагреваемый изнутри спиралью из нихрома.

Средний цилиндр – пористый, через него в кольцевую полость навстречу тепловому потоку подается охлаждающий воздух, выходящий затем наружу через отверстия в торцевой стенке. Наружный цилиндр – непроницаемый, образующий кольцевой ресивер для подвода охлаждающего воздуха. Все стенки и кольцевые полости термометрированы. Замерялись также температура, давление и расход воздуха на входе в установку.

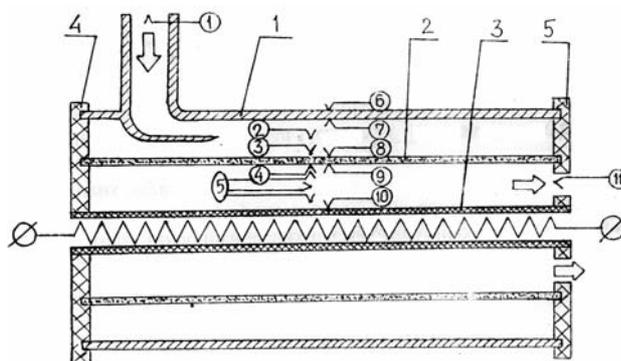


Рис.1. Схема экспериментальной установки №1: 1 - наружный корпус; 2-пористый цилиндр; 3-нагреватель; 4,5-торцевые стенки

Конструкция установки № 2 с точки зрения изучаемых процессов была аналогична первой и отличалась возможностью изменения величины зазора между нагревателем и пористой стенкой для исследования влияния этого параметра.

Места расположения спаев термопар в экспериментальной установке № 1 на схеме изображены условно и представлены цифрами в кружках.

### 4. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ РАССМАТРИВАЕМОГО СЛУЧАЯ

Механизм теплопередачи в системе трех коаксиально расположенных цилиндров (3-х параллельных стенок) складывается из нескольких тепловых процессов, которые должны быть отражены при составлении баланса распределения теплоты  $Q = \dot{G}R$ , генерируемой источником. Этот баланс

включает в себя тепловые потоки, идущие на нагревание: воздуха, вошедшего через пористую стенку в горячий зазор  $Q_{г.з.з.}$ ; пористой стенки воздухом, нагретым в горячем зазоре  $Q_{п.}$ ; воздуха в ресивере от нагретой пористой стенки  $Q_{в.з.з.}$ ; наружной стенки с внутренней стороны  $Q_{к.нар.}$ ; наружного воздуха  $Q_{в.нар.}$ ; на утечки через торцевые (боковые) стенки  $Q_{ут.}$ .

Можно записать

$$Q = Q_{г.з.з.} + Q_{п.} + Q_{в.з.з.} + Q_{ут.} + Q_{к.нар.} + Q_{в.нар.} \quad (1)$$

Здесь

$$Q_{п.} = Q_{п.ст.} + Q_{в.} \quad (2)$$

$Q_{п.ст.}$ ,  $Q_{в.}$  – тепловой поток, переданный пористой стенке и воздуху внутри поровых каналов, соответственно.

С другой стороны, тепловой поток, воспринятый охлаждающим воздухом при его прохождении от входа в установку до выхода из нее,

$$Q_1 = C_p G_B (T_{в.вых.} - T_{в.вх.}) \quad (3)$$

Тогда тепловой поток, генерируемый источником теплоты

$$Q = Q_1 + Q_{ут.} + Q_{к.нар.} + Q_{в.нар.} \quad (4)$$

Отсюда

$$Q_{ут.} + Q_{к.нар.} + Q_{в.нар.} = Q - Q_1 \quad (5)$$

Тепловой поток, передаваемый воздуху в зазоре с горячей стороны, рассчитывается так:

$$Q_{г.з.з.} = G_B C_p (T_{в.вых.} - T_{в.п.вых.}) \quad (6)$$

Тепловой поток, соответствующий изменению энтальпии воздуха от входа в ресивер до входа в поры

$$Q_{в.з.з.} = G_B C_p (T_{в.п.вх.} - T_{в.вх.}) \quad (7)$$

Тепловой поток, переданный пористой стенке

$$Q_{п.} = Q_1 - Q_{г.з.з.} - Q_{в.з.з.} \quad (8)$$

Плотность теплового потока, воспринятого пористой стенкой:

$$q_{п.} = \frac{Q_{п.}}{F_{п.вн.}} \quad (9)$$

где  $F_{п.вн.} = \pi \cdot D_{п.вн.} \cdot L$  – площадь пористой стенки с горячей стороны.

С другой стороны, плотность теплового потока рассчитывалась как среднеинтегральная величина, учитывающая распределение температуры в прослойке  $\delta$  между нагретым и пористым цилиндрами [1], ошибка при этом не превышала 2 %:

$$q_{п.} = \sum_{i=0}^{\delta} q_i \frac{\Delta \delta_i}{\delta} = \sum_{i=0}^{\delta} \frac{\lambda_i}{\Delta \delta_i} (T_i - T_{i+1}) = \frac{\lambda_{эф.}}{\delta} (T_{г.} - T_{п.вн.}) \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи от нагретого в прослойке воздуха к пористой стенке вычислялся как

$$\alpha_{п.} = \frac{q_{п.}}{T_{г.} - T_{п.вн.}} \quad (11)$$

Эффективность охлаждения определялась в соответствии с [2]:

$$\theta = \frac{T_{г.} - T_{п.вн.}}{T_{г.} - T_{в.вх.}} \quad (12)$$

Все приведенные параметры рассчитывались по замеряемым в опытах значениям расхода воздуха  $G_B$ , давления  $P$ , температуры  $T$ , силы тока  $I$ , сопротивления  $R$ . Входящие в уравнение (1) величины  $Q_{ут.}$ ,  $Q_{к.нар.}$ ,  $Q_{в.нар.}$  суммарно не превышали 2 % от  $Q$ .

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

Результаты замеров температурных полей при варьировании параметрами расхода при постоянной интенсивности нагрева, и интенсивностью нагрева при постоянном расходе, полученные на установке 1, представлены на рис. 2. Рис. 2 а, б, в и г показывают изменения полей температур воздуха и всех поверхностей рабочего участка установки 1 при изменении температурного напора для постоянных значений расхода.

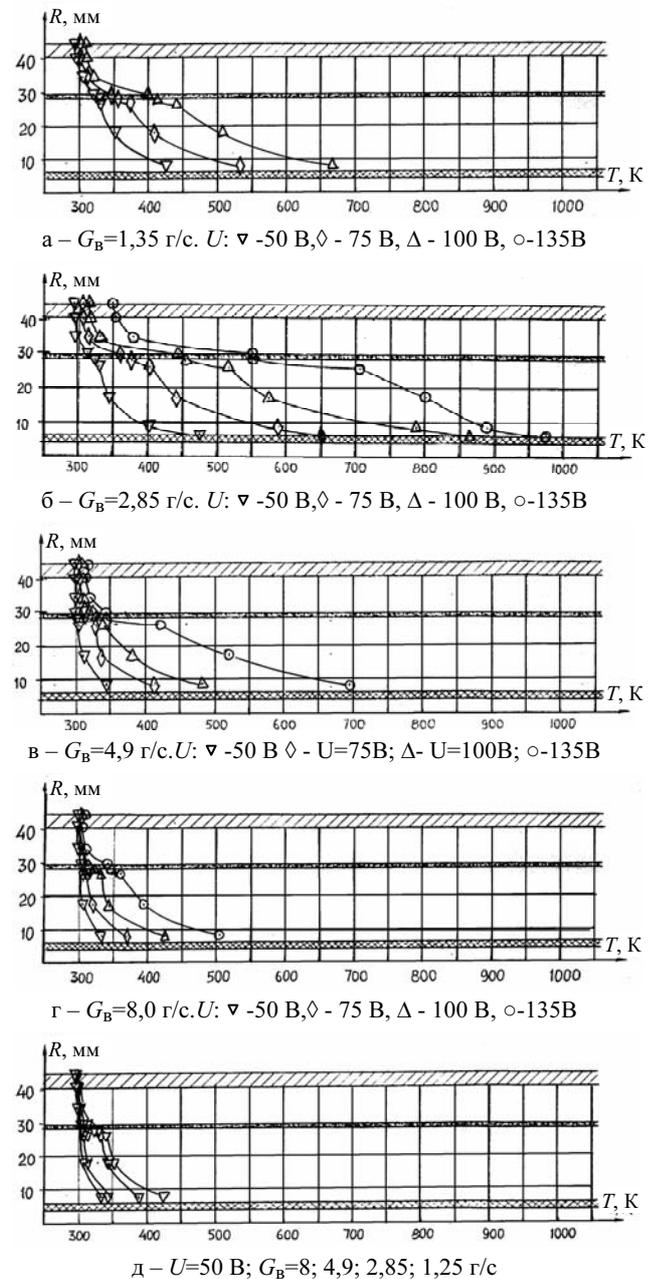
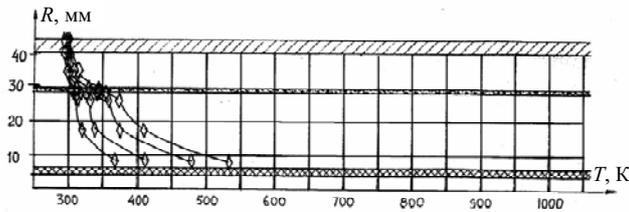
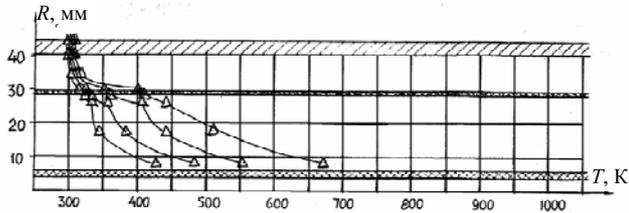


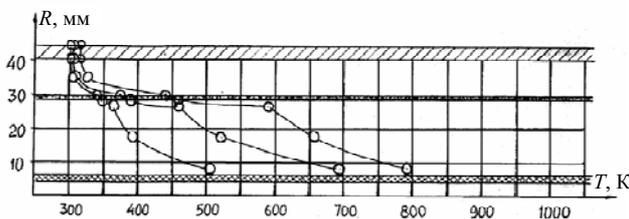
Рис. 2.



e –  $U=75$  В;  $G_B=8; 4,9; 2,85; 1,25$  г/с



ж –  $U=100$  В;  $G_B=8; 4,9; 2,85; 1,25$  г/с



з –  $U=135$  В;  $G_B=8; 4,9; 2,85$  г/с

Рис. 2. Окончание

По мере увеличения расхода охлаждающего воздуха  $G_B$  отсечение теплового потока от пористой стенки проникает глубже по зазору и в большей степени начинает снижать температуру нагретой (горячей) стенки. При достижении определенных значений дальнейшее увеличение расхода нецелесообразно, так как температура пористой оболочки приближается к температуре воздуха на входе в ресиверную прослойку. Увеличение расхода до некоторых оптимальных значений улучшает эффективность охлаждения, приближая её к  $\theta = 1$ , особенно в легкопроницаемых пористых материалах.

Рис. 2 д, е, ж и з также подтверждают высокую эффективность тепловой завесы, создаваемой пористым вдувом. При постоянных значениях нагрева горячей стенки менялся расход воздуха  $G_B$  через пористую стенку. Так же, как и в описанном выше случае, отслеживается значительное повышение температуры воздуха вблизи нагревателя, а температура пористой стенки и непроницаемой наружной поверхностей стабильно удерживается вблизи приемлемых значений. Следует подчеркнуть, что увеличение расхода воздуха выше некоторого предельного значения не приводит к ощутимому снижению температур пористой стенки и наружной оболочки. Это подтверждает существующее представление о характере пограничного слоя при пористом вдуве, когда охладитель отселяет горячий тепловой поток от стенки вплоть до полной ее изоляции.

## 6. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На базе первичной информации – замеренным в экспериментах величинам расхода, давления, распределения температур производились обработка и обобщение результатов.

Результаты опытов по эффективности охлаждения  $\theta$  пористой стенки представлены в виде зависимости  $\theta = f(\text{Re}_r, \frac{T_r}{T_{в.вх}})$  на рис. 3.

Здесь число Рейнольдса  $\text{Re}_r = \frac{G_B}{F_{п.вн}} \cdot \frac{2\delta}{\mu_{ср}}$ .

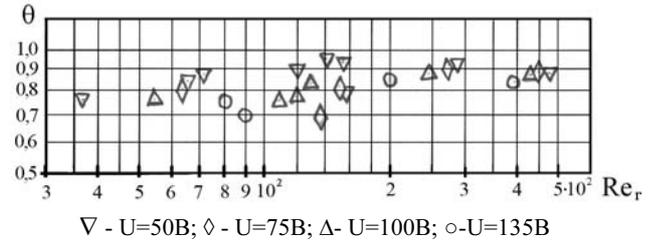


Рис. 3

Различными значками обозначены точки, соответствующие различным значениям напряжения тока  $U$ , соответствующие температурному фактору  $(\frac{T_r}{T_{в.вх}})$ . Увеличение температурного фактора (напора) ведет к уменьшению эффективности  $\theta$ , а увеличение расхода (числа Рейнольдса) несколько увеличивает её.

В результате математической обработки получена обобщающая зависимость

$$\theta = 0,7 \text{Re}^{0,1} \left( \frac{T_r}{T_{в.вх}} \right)^{-0,5} \quad (13)$$

Результаты опытов в обобщенном виде представлены на рис. 4. Они с достаточно высокой степенью точности располагаются вблизи зависимости (13).

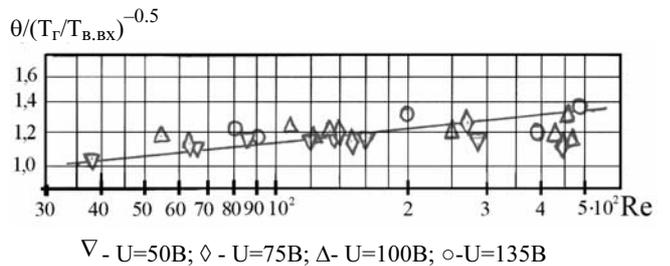


Рис. 4

Обобщение результатов опытов по исследованию теплоотдачи к поверхности пористой стенки со стороны нагревателя ( $\alpha_n$ ) позволило получить следующую зависимость:

$$\text{Nu}_n = 4,2 \cdot \text{Re}_{ср}^{-0,1} \left( \frac{T_r}{T_{в.вх}} \right)^{0,5} \quad (14)$$

Зависимость (14) дана в графическом изображении на рис. 5.

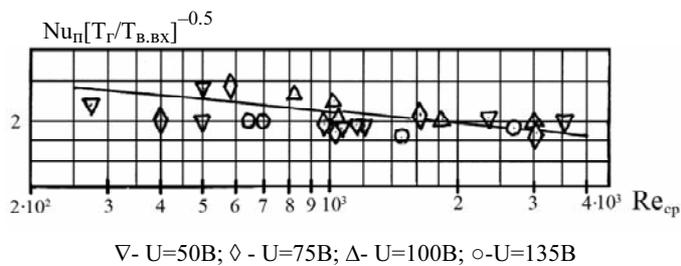


Рис. 5

Анализ результатов показывает, что при отсутствии противодействия и основного сносящего потока эффективность пористого охлаждения высока, а коэффициенты теплоотдачи низкие, особенно при использовании легкопроницаемых пористых материалов, что делает привлекательным их применение при тепловой защите окружающей среды от горячих элементов энергоустановок. Кроме того, улучшается экономичность двигателей за счет снижения потребного расхода охлаждающего воздуха и энергозатрат на его прокачку.

Анализ имеющихся в литературе данных [3, 4, 5] по теплоотдаче со стороны охлаждающего воздуха, входящего в пористую оболочку, показывает на их ограниченность и разноречивость. Коэффициенты при числе Рейнольдса изменяются почти на порядок. Воспользоваться ими в качестве граничных условий некорректно. Экспериментальное изучение данного вопроса пополняет банк данных.

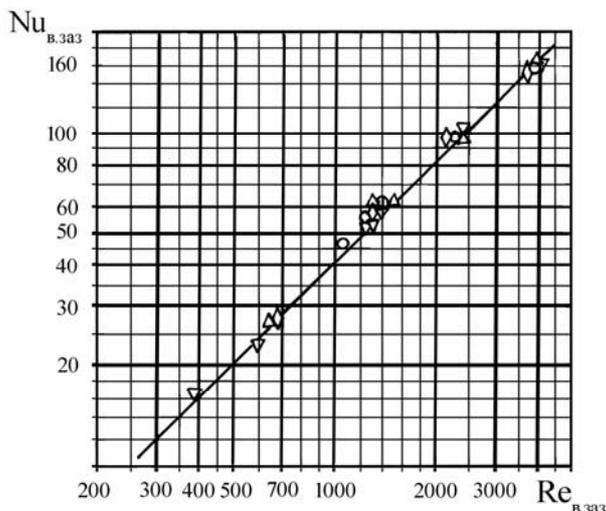


Рис. 6

Результаты опытов по изучению процесса теплоотдачи от нагретой пористой стенки к входящему в нее воздуху из ресивера показаны на рис. 6 в виде графической зависимости  $Nu_{в.з.з} = f(Re_{в.з.з})$ . Экспериментальные точки с высокой степенью точности аппроксимируются зависимостью

$$Nu_{в.з.з} = 0,004 \cdot Re_{в.з.з} \quad (15)$$

Здесь  $Re_{в.з.з} = \frac{G_{в}}{2F_{в \text{ кольц. заз.}}} \cdot \frac{2\delta}{\mu_{ср}}$  - число Рей-

нольдса по средним параметрам в кольцевом канале (ресивере).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают существующие представления о высокой эффективности охлаждения пористым вдувом и свидетельствуют о возможности расширения сферы применения данного способа на случаи формирования тепловой завесы в зонах, где отсутствует основной сносящий поток.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $Q$  – тепловой поток;
- $q$  – плотность теплового потока;
- $P$  – давление;
- $T$  – температура;
- $G$  – расход;
- $\theta$  – эффективность охлаждения, безразмерная температура;
- $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;
- $\delta$  – зазор; толщина;
- $F$  – площадь;
- $C_p$  – теплоемкость;
- $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;
- $Re$  – число Рейнольдса;
- $Nu$  – число Нуссельта;
- $I$  – сила тока;
- $U$  – напряжение электрического тока.

## Индексы:

- п – пористая стенка;
- г – горячая зона;
- в – воздух;
- ст – стенка;
- вн – внутренний;
- нар – наружный;
- з.з.з – зазор;
- в – объемный;
- ут – утечка;
- вх – параметр на входе;
- ср – среднее значение параметра;
- кольц – кольцевой;
- вых – параметр на выходе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манушин Э.А., Барышникова Э.С. Системы охлаждения турбин высокотемпературных ГТД. /Итоги науки и техники. Серия «Турбостроение», 1980. Т. 2. 280 с.
2. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высш. шк., 1975. 2-е изд. 496 с.
3. Епифанов В.М., Манушин Э.А. Некоторые результаты исследования пористого охлаждения лопаток газовых турбин // ИФЭИ. 1975. Т. XXVIII. № 3. С. 533–544.
4. Bayley F.I., Turner A.B. The heat – transfer performance of porous gas turbine blades. / The aeronautical journal of the RAS, v. 72, №696, December, 1968. P. 1087–1094.
5. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.