

УДК 533.6.011.6

А.Н. Голованов, Е.В. Рулёва

О ВЛИЯНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ГАЗА-ОХЛАДИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ПОРИСТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Исследованы условия воздействия периодических пульсаций газа-охлади-теля в системе активной тепловой защиты. Показана восприимчивость системы пористого охлаждения к воздействию малых энергетических возмуще-ний. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами аналитического решения математической модели Ю.В. Полежаева.

Ключевые слова: *теплообмен, эксперимент, математическая мо-дель, пульсации газа-охлади-теля.*

Системы пористого охлаждения находят широкое применение в технике: пористые топливные элементы ядерных реакторов, различные компактные пароге-нераторы, испарительные системы, фильтры, элементы тепловой защиты лета-тельных аппаратов [1 – 3]. Эксплуатация таких систем, как правило, сопровож-дается малыми возмущениями – вибрациями стенок, пульсациями давления, акусти-ческими колебаниями, турбулентными шумами. В зависимости от типа возмуще-ний, частоты и амплитуды колебаний фильтрационные и тепловые характери-стики пористых материалов могут искажаться.

Вибрации машин могут оказаться причиной ненормального их функциони-рования и приводить к авариям, кроме того, вибрации при достаточной интен-сивности оказывают вредное влияние на человека. Однако существует целый класс машин, в которых вибрации служат основой рабочего процесса.

Колебательное движение газа и жидкости служит причиной интенсифика-ции обширного круга процессов тепло- и массопереноса и приводит к усиле-нию теплообмена тел, сушки, диффузии, растворения, электроосаждения и т.д. [4 – 8].

Проблема малых возмущений особенно актуальна при изучении перехода ламинарных течений в турбулентные, генерации турбулентных акустических шумов, при исследовании восприимчивости турбулентных течений к периоди-ческим возмущениям [3, 4, 9 – 14].

Колебательные и вибрационные процессы сопутствуют почти всем явлени-ям природы и могут быть как полезны, так и вредны. Вопросы интенсификации процессов теплообмена, управление пограничными слоями, оптимизация производства в теплоэнергетике и химической технологии представляют инте-рес как с научной точки зрения, так и с практической. Следовательно, актуаль-ность рассматриваемых задач вытекает из потребностей развития энергетики, машиностроения, ракетно-космической техники, химических технологий на со-временном этапе.

Целью данной работы является исследование системы пористого охлаждения в присутствии малых энергетических возмущений, а также сравнение полученных результатов с известными.

На рис. 1. показана принципиальная схема проведения экспериментов. Пластины 1 из пористых материалов (нержавеющая сталь) герметично поджимались в малое основание усеченного конуса 2. Стрелками 3, 4 обозначены вдуваемый газ (воздух, азот) и внешний поток воздушной плазмы. Пульсации давления газа-охлаждателя и линейные относительно оси симметрии модели вибрации генерировались с помощью вала электродвигателя 5 и червяка 6. Частота возмущений f и амплитуда A регулировались скоростью вращения вала электродвигателя ω и геометрическими размерами червяка. Частота и амплитуда варьировались в пределах $f = (0 - 25)$ Гц, $A = (0,5 - 7,0) \cdot 10^{-3}$ м.

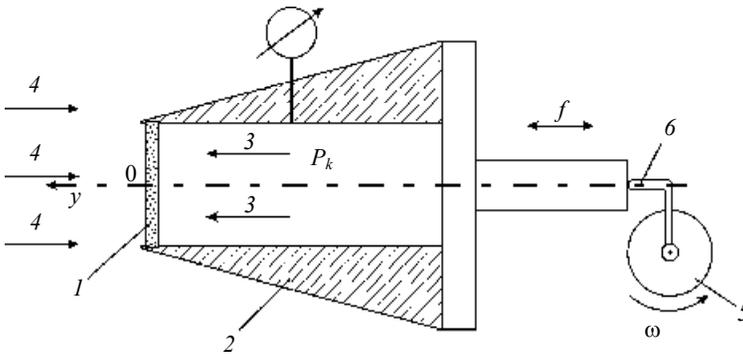


Рис. 1. Модель для сравнительных испытаний: 1 – пористая пластина; 2 – модель в виде усеченного конуса; 3 – вдуваемый газ (воздух, азот); 4 – внешний поток воздуха; 5 – электродвигатель; 6 – червяк

Параметры воздушной плазменной струи составляли: $T_{\infty} = (3300 - 4900)$ К – среднemasовая температура (определялась из условия энергетического баланса работы плазмотрона по известной методике, изложенной в работах [15, 16], погрешность определения не превышала 10 %); $G_{\infty} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с – расход плазмообразующего газа (определяется ротаметром типа РС (РМ, РМЖ), класса точности 2,5, погрешность определения не превышала 5 %); $T_e = (3100 - 3600)$ К – температура плазмы в рабочем сечении струи (определялась с помощью калориметрического зонда по известной методике, изложенной в работе [17], погрешность определения не превышала 9 %); $v_e = (32 - 57)$ м/с – скорость плазмы в рабочем сечении струи определялась водоохлаждаемым насадком Пито с погрешностью не более 8 %.

Процесс теплообмена в пористой стенке при наличии вдува газа-охлаждателя описывается с помощью двухтемпературной нестационарной модели, предложенной в работе [18] Ю.В. Полежаевым. Она представлена в виде законов сохранения тепла в твердой стенке (1) и в газе (2).

$$\rho_1 c_{p1} (1 - \Pi) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_1 (1 - \Pi) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right] + \alpha_V (T_1 - T_2); \quad (1)$$

$$\Pi c_{p2} \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + v \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \Pi \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) - \alpha_V (T_1 - T_2) \quad (2)$$

с граничными условиями

$$T_1|_{l=0} = T_2|_{l=0} = T|_{l=0} = T_H; \quad (3)$$

$$(q_w - \varepsilon \sigma T_{1w}^4)(1 - \Pi) = -\lambda_1(1 - \Pi) \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}; \quad (4)$$

$$(q_w - \varepsilon \sigma T_{2w}^4)\Pi = -\lambda_2 \Pi \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}; \quad (5)$$

$$-\lambda_1(1 - \Pi) \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right) \Big|_{x=l} = \alpha(T_1 - T_H); \quad (6)$$

$$-\lambda_2 \Pi \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right) \Big|_{x=l} = \frac{\alpha c_p}{(\rho v)_w} (T_2 - T_H). \quad (7)$$

Здесь t – время; T_1 – температура стенки; T_2 – температура газа-охладителя; T_H – начальная температура; ρ – плотность; v – скорость фильтрации газа 2; $(\rho v)_w$ – расход газа-охладителя в порах; c_p , λ – коэффициенты теплоемкости, теплопроводности; Π – пористость; α_v – объемный коэффициент теплообмена между газом и каркасом; σ – постоянная Стефана – Больцмана; h – энтальпия; q_w – плотность теплового потока, (α/c_{p0}) – отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту теплоемкости, α – коэффициент удельной теплоемкости.

В условиях проведения экспериментов использовались сильные вдувы $B > 2$, поэтому рассматриваемую задачу можно свести к одномерной однотемпературной постановке:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T}{dx^2} &= -a \frac{dT}{dx}; \\ \left(\frac{\alpha}{c_p} \right) (h_e - h_w) &= -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=l}; \\ T|_{l=0} &= T_H, \\ a &= \frac{B \cdot (\alpha/c_p)_0 \cdot c_{p2}}{\lambda}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$B \text{ – безразмерный параметр вдува, } B = \frac{(\rho v)_w}{(\alpha/c_p)_0}.$$

Интегрируя (8), получим аналитическое решение

$$T = \frac{\lambda a}{\alpha(1 - e^{-al}) + \lambda a} \left[\frac{\alpha h_e (1 - e^{-al})}{c_p \lambda a} + T_H + \frac{1 - e^{-ax}}{a} \cdot \left(\frac{\alpha T_H}{\lambda} - \frac{\alpha h_e}{c_p \lambda} \right) \right] \quad (9)$$

Теперь добавим в решение (9) малые энергетические возмущения, представленные в следующем виде [19]:

$$v' = \frac{\delta x \omega \cos(\omega t)}{2\pi}$$

– значения пульсаций скорости газа-охладителя;

$$\lambda' = \frac{\pi c_p \rho v'^2}{\omega}$$

– пульсационная составляющая эффективного коэффициента теплопроводности, где $\omega = 2\pi\nu$. Здесь δx – амплитуда колебаний, ω – циклическая частота.

Получаем следующее решение:

$$T = \frac{(\lambda + \lambda')a}{\alpha(1 - e^{-\alpha l}) + (\lambda + \lambda')a} \left[\frac{\alpha h_e(1 - e^{-\alpha l})}{c_p(\lambda + \lambda')a} + T_n + \frac{1 - e^{-\alpha x}}{a} \cdot \left(\frac{\alpha T_n}{\lambda} - \frac{\alpha h_e}{c_p(\lambda + \lambda')} \right) \right] \quad (10)$$

На рис. 2 показаны результаты измерений температуры пористой стенки в окрестности лобовой критической точки в зависимости от параметра вдува без пульсаций газа-охладителя – кривая 1, с пульсациями частоты 5,2 Гц – кривая 2, и 7,2 Гц – кривая 3.

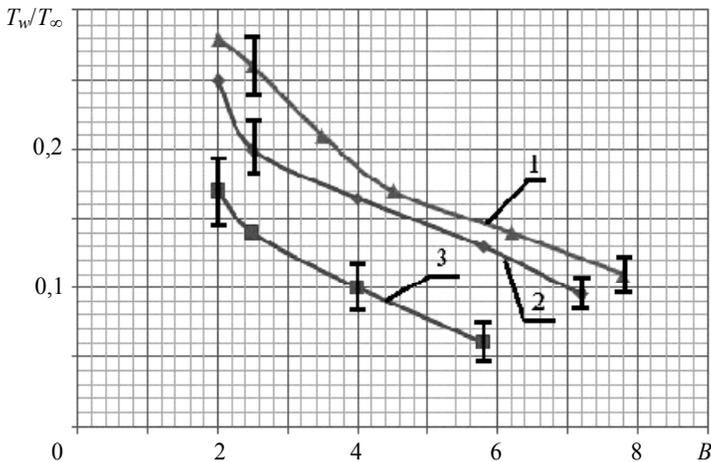


Рис. 2. Экспериментальные зависимости безразмерной температуры ($T_\infty = 3600$ К) стенки от параметра вдува (B). Кривая 1 – без пульсаций газа-охладителя, кривая 2 – пульсации с частотой 5,2 Гц, кривая 3 – пульсации с частотой 7,2 Гц

Видно, что пульсации газа снижают тепловые нагрузки, температура стенки при этом уменьшается. Такая тенденция наблюдается во всем диапазоне исследуемых параметров вдува $2,0 \leq B \leq 7,8$.

На рис. 3. представлено сравнение экспериментальных результатов для безразмерной температуры стенки с пульсациями газа частоты 5,2 Гц, кривая 2 и результатов, полученных при помощи найденного аналитического решения (10), кривая 1. Из рис. 2 видно, что для слабых вдувов $B < 2,5$ аналитическое решение (10), основанное на математической модели [18] удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента. Для сильных вдувов $B > 2,5$ наряду с регенеративным снижением тепловых нагрузок к защищаемой стенке (механизм охлаждения за счет процессов конвекции и теплопроводности) присутствует механизм оттеснения пограничного слоя и высокотемпературного набегающего потока, что не учитывается в модели [18] и поэтому наблюдается существенное расхождение экспериментальных и расчетных результатов, кривая 2 на рис. 3. находится ниже кривой 1.

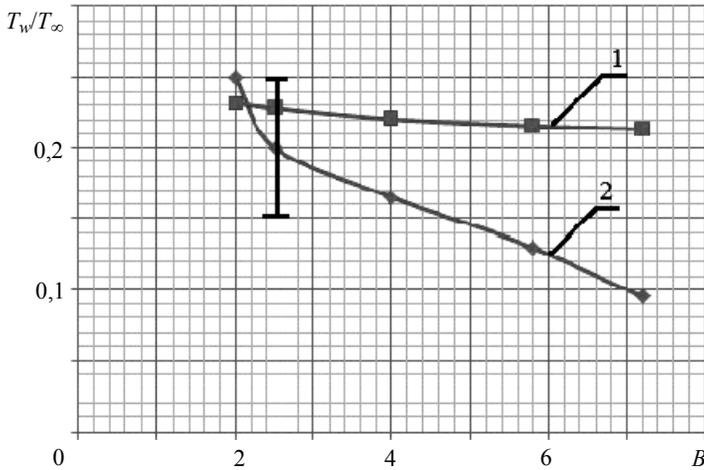


Рис. 3. Зависимость безразмерной температуры стенки от параметра вдува. Кривая 1 – кривая, полученная при помощи найденного аналитического решения (10), кривая 2 – экспериментальная кривая с пульсациями частотой 5,2 Гц

Таким образом, пульсации газа-охладителя в исследуемом диапазоне амплитудно-частотных характеристик колебаний ослабляют процесс теплообмена между потоком плазмы и стенкой. Механизм воздействия малых периодических возмущений на системы пористого охлаждения, следующий [17].

Периодические возмущения приводят к появлению дополнительного «транспорта» тепла вглубь защищаемой стенки $q = -(\lambda + \pi c_p \bar{\rho} \bar{u}^2 / \omega) \partial T / \partial x$ за счет эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эфф} = \lambda' = -\pi c_p \bar{\rho} \bar{u}^2 / \omega$. Расчеты [19] показывают о возможном пятикратном увеличении $\lambda_{эфф}$. Поэтому температура поверхности пористого материала и плотность теплового потока при пульсациях газа уменьшаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василевский Э.Б. Физические процессы активной тепловой защите гиперзвуковых летательных аппаратов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Жуковский, 2006.
2. Никитин П.В. Тепловая защита. М.: Изд-во МАИ, 2006. 512 с.
3. Зубарев В.М. Эффективность охлаждения и теплопередача в тепловой завесе, создаваемой пористым вдувом: автореф. дис. ... канд. технич. наук. Казань, 2008.
4. Качанов Ю.С., Козлов В.В., Левченко В.Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 152 с.
5. Бергман Л. Ультразвук и его применения в науке и технике. М.: Мир, 1957. 216 с.
6. Константинов Б.П. Гидродинамическое звуковое распространение звука в ограниченной среде. Л.: Энергия, 1974. 233 с.
7. Борисов Ю.Я., Гынкина Н.М. Физические основы ультразвуковой технологии // Акустическая сушка. М.: Наука, 1970. С. 16–27.
8. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Наука, 1972. 194 с.
9. Власов Е.В., Гиневский А.С. Генерация и подавление турбулентности в осесимметричной турбулентной струе при акустическом воздействии // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 6. С. 37–42.

10. Власов Е.В., Гиневский А.С. Когерентные структуры в турбулентных струях и следах // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Механика жидкости и газа. 1986. № 20. С. 3–84.
11. Федоров А.В. Возбуждение волн Толлмина – Шлихтинга в пограничном слое периодическим внешним воздействием, локализованным на обтекаемой поверхности // МЖГ. 1984. № 6. С. 36–41.
12. Козлов В.В., Левченко В.Я., Сарик В.С. Образование трехмерных структур при переходе к турбулентности в пограничном слое // МЖГ. 1984. № 6. С. 42–50.
13. Грешилов Е.М. Псевдозвук и вихри Клайна // Акуст. журнал. 1985. Т. 21. Вып. 3. С. 320–322.
14. Козлов В.В. Отрыв потока от передней кромки профиля и влияние на него акустических возмущений // ЖПМТФ. 1985. № 2. С. 112–115.
15. Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы.
16. Юревич Ф.Б. Электродуговой нагрев газа.
17. Голованов А.Н. Гидродинамические и тепловые характеристики систем пористого охлаждения при наличии малых периодических возмущений // ИФЖ. 1994. Т. 66. № 6. С. 695–701.
18. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
19. Ажищев Н.А., Быков В.И. Об интенсивности переноса тепла в пористых средах при пульсациях давления // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. Вып. 6. № 21. С. 27–30.

Статья поступила 26.06.2010 г.

Golovanov A.N., Rulyova E.V. ON THE INFLUENCE OF PERIODIC PULSATIONS OF A GAS-COOLER ON HEAT EXCHANGE CHARACTERISTICS IN A SYSTEM OF POROUS COOLING. Conditions of influence of periodic pulsations of gas-cooler in system of active thermal protection are investigated. The susceptibility of the system of porous cooling to the influence of small power indignations is shown. The experimental results are compared with the results of the analytical solution of the mathematical model by Yu.V. Polezhaev.

Keywords: heat exchange, experiment, mathematical model, pulsations of a gas-cooler.

GOLOVANOV Aleksandr Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: fire@mail.tsu.ru

RULYOVA Evgeniya Valeryevna (Tomsk State University)

E-mail: mikoto_88@sibmail.com