

Исследование характеристик высококомпактных пластинчато-ребристых поверхностей теплообмена со смещенным ребром

06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0431788

Егоров К. С., Щеголев Н. Л.

УДК 536.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

serg7573@pochta.ru**Введение**

Одним из вариантов обеспечения энергетических потребностей различных космических аппаратов является применение замкнутой газотурбинной установки (ЗГТУ). ЗГТУ могут также найти применение в наземных условиях в качестве автономного источника электроэнергии малой мощности. Применение ГТУ открытого цикла в этом случае наталкивается на определенные трудности, связанные с низкими значениями коэффициентов полезного действия (КПД) компрессора и турбины. Это связано с малыми размерами колес турбомашин.

Ограничение на температуру газа перед турбиной ЗГТУ из-за отсутствия системы охлаждения диктует необходимость искать другие способы увеличения коэффициента полезного действия замкнутой газотурбинной установки. В частности, возможно применение регенератора – теплообменного аппарата рекуперативного типа, предназначенного для передачи тепла от выходящих горячих газов турбины к холодному воздуху от компрессора. Отметим, что в отличии от газотурбинной установки открытого цикла, где применения

регенерации не всегда возможно, в ЗГТУ использование регенерации целесообразно всегда.

Для снижения массо-габаритных показателей регенератора предлагается использование высококомпактных поверхностей теплообмена. Они представляют собой пластинчато-ребристые поверхности теплообмена с шахматным расположением ребра [1-3].

1. Постановка задачи

Наиболее полный и обстоятельный обзор по пластинчато-ребристым поверхностям был выполнен в работе [4]. Он выявил следующие проблемы в данной области.

1) Многие авторы, проводившие экспериментальные и численные исследования с применением собственных и коммерческих программных средств, получали противоречивые и неоднозначные результаты, что авторы обзора объясняют различной технологией изготовления поверхностей, условиями экспериментальных испытаний и т.д.

2) Полное отсутствие в открытой печати данных по исследованиям таких поверхностей на смесях инертных газов с аномально низкими числами Прандтля ($Pr = 0,2...0,4$), все эксперименты проводились на воздухе ($Pr = 0,7$) или на жидкостях ($Pr > 1,0$).

Целью данного экспериментального исследования является определение теплогидравлических характеристик поверхностей теплообмена с различными газами и смесями газов.

Таким образом, актуальность и новизна работы определяется тем, что необходимо иметь собственные пластинчато-ребристые поверхности

теплообмена изготовленные по собственной отработанной технологии и иметь их характеристики. Также отметим, что по сравнению с данными в работе [1], в представленной работе расширен диапазон по числу Рейнольдса.

2. Поверхность теплообмена

Общий вид поверхности теплообмена приведен на рис. 1. Всего предполагается испытать три пластинчато-ребристых поверхности (МВТУ №9, №10, №11) с шахматным расположением ребер и прямоугольными каналами между ними для получения характеристик теплоотдачи и трения. Фотография поверхности МВТУ №9 показана на рис. 2. Они относятся к классу пластинчато-ребристых поверхностей с плоскими ребрами, изготовленными из сплошной ленты.

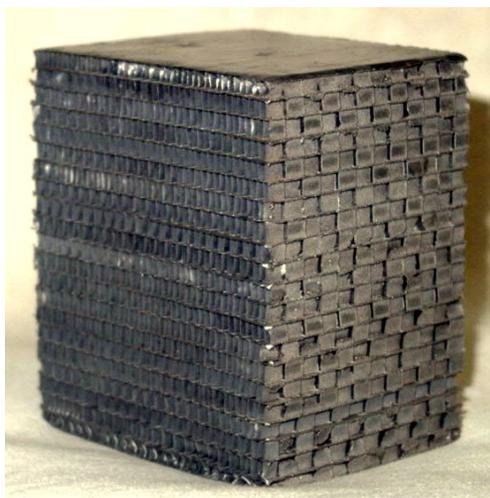


Рисунок 1 - Фотография испытываемой модели (МВТУ №9)

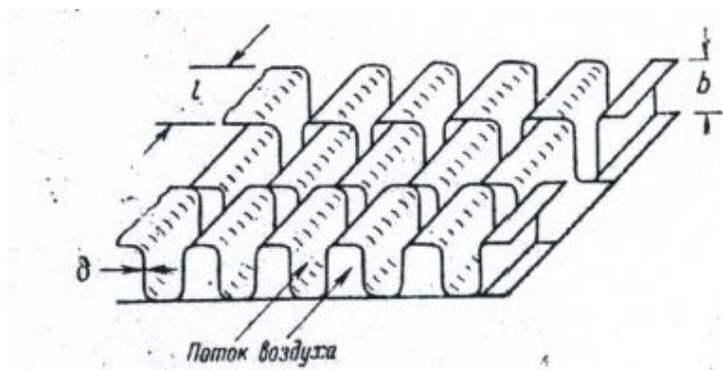


Рисунок 2 - Общий вид пластинчато-ребристой поверхности теплообмена. l – длина ребра в направлении потока; b – высота поверхности; δ – толщина поверхности

Ребра в виде изогнутых полос смещены одно относительно другого приблизительно на 50 %, так что передняя кромка ребра расположена в середине канала, образованного двумя ребрами предшествующей полосы. Геометрические характеристики исследуемой поверхности теплообмена приведены в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики поверхности теплообмена

№ п/п	Параметр, ед. измерения	Значение
1	Гидравлический диаметр d_3 , мм	2,52
2	Шаг ребер, мм	1,9
3	Расстояние между пластинами, мм	3,85
4	Толщина ребра δ , мм	0,1
5	Условный коэффициент компактности, $\text{м}^2/\text{м}^3$	1557
6	Отношение площадей проходного сечения и фронта $A_{\text{ж}}/A_{\text{фр}}$	0,854
7	Отношение площади ребер и полной $A_{\text{р}}/A$	0,64

3. Методика эксперимента

Целью работы является экспериментальное получение характеристик поверхностей в виде

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \text{и} \quad Eu = f(Re, Pr),$$

где Nu - число Нуссельта; Re - критерий Рейнольдса; Pr - число Прандтля; Eu - критерий Эйлера.

Теоретические основы нестационарного метода были заложены Нуссельтом, Хаузенем (1927) и Шуманом (1929), когда они решали задачу о распределении температуры в пористом теле в зависимости от координат и от времени, находящегося сначала при постоянной температуре, а затем в начальный момент времени происходит изменение температуры газа, поступающего в тело [5-7].

Шуман рассматривал задачу о нагревании холодного пористого тела, очень быстрого помещенного в струю горячего газа. Этот метод можно использовать для исследования теплообменных решеток, у которых значения коэффициент фронта достаточно близок к единице, т.е. для которых можно пренебречь продольной теплопроводностью.

Допущения:

- 1) теплопроводность стенки бесконечно велика по направлению, нормальному к потоку газа и равна нулю по направлению потока;
- 2) скорость и температура потока при входе в решетку - постоянны;
- 3) физические свойства газа и материала решетки постоянны;
- 4) средний коэффициент теплоотдачи постоянен;
- 5) в начальный момент времени происходит ступенчатое увеличение температуры газа при входе в решетку.

При изложенных выше допущениях Шуман, а затем еще несколько авторов получили решение, которое позволяет по изменению температуры газа за матрицей определить коэффициент теплоотдачи. Изложенный выше метод, соответствующим образом измененный для практического применения, был апробирован в работах [7-8].

4. Экспериментальный стенд

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 3.

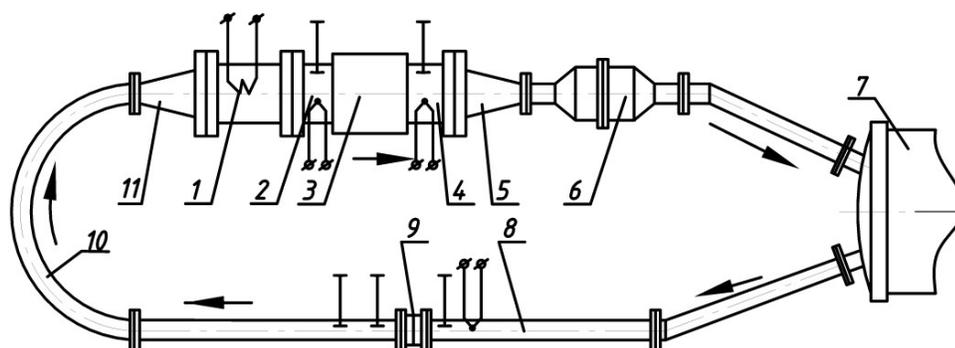


Рисунок 3 - Схема стенда нестационарного теплообмена. 1 – нагреватель; 2 – корпус установки измерительных приборов; 3 - корпус установки исследуемой поверхности теплообмена; 4 – корпус установки измерительных приборов; 5- диффузор; 6 – электрокомпрессор; 7 – теплообменный аппарат отвода тепла; 8 – трубопровод; 9 – расходомерное устройство (стандартная диафрагма); 10 – трубопровод; 11 – конфузор

Циркуляция рабочей среды на испытательном стенде осуществляется при помощи компрессора 6. Для поддержания стабильности температуры в контуре

стенда рабочее тело поступает вначале в теплообменник отвода тепла 7. Далее по его ходу расположено расходомерное устройство 9 (стандартная диафрагма), с помощью которого измеряется расход рабочего тела. За диафрагмой находится нагреватель 1. Нагревательный элемент выполнен из тонкой нихромовой проволоки $\varnothing 0,08$ мм, благодаря чему инерционность нагревателя очень мала. Нагреватель так же выполняет роль успокоителя, чем обеспечивает равномерность потока в исследуемой модели.

За нагревателем расположена исследуемая модель (3). Модель окружена слоем пенопласта, препятствующего подводу теплоты извне, к поверхности модели.

Перед диафрагмой, перед нагревателем, перед и за испытываемой моделью, на самой модели установлены хромель-копелевые термопары для определения температуры стационарного состояния потока и для записи температуры воздуха на выходе из модели в нестационарном режиме.

Частота вращения компрессора, и изменение расхода газа осуществляется при помощи частотного преобразователя. Перепад давлений, необходимый для определения коэффициента сопротивления и расхода воздуха через модель, измеряется с помощью датчиков статического давления, расположенных непосредственно перед и за исследуемой моделью и диафрагмой. Для точного и надежного исследования процессов нестационарного теплообмена используется современный измерительный комплекс фирмы *National Instruments* в составе: платы NI M2455 с аналого-цифровым преобразователем разрядностью 16 бит и компьютером *Pentium IV 2,2 ГГц*.

5. Заключение

На рисунках 4 и 5 приведены результаты проведенных экспериментов в виде зависимостей $Nu = f(Re)$, $Eu = f(Re)$ для поверхности МВТУ №9 при

течении воздуха. Пунктирными линиями на рисунках показаны зависимости известной теплообменной поверхности 104 [1]. Для поверхности МВТУ №9 характерны более низкие по сравнению с поверхностью 104 значения Nu и Eu при одинаковых числах Рейнольдса. Анализ полученных данных показывает, что по эффективности (Nu/Eu) в диапазоне числа Рейнольдса 500...900 поверхности сопоставимы, а при числе Рейнольдса ниже 500, поверхность МВТУ №9 имеет эффективность выше на 5-7 %. Отметим, что для замкнутых газотурбинных (тригенерационных) установок малой мощности характерны низкие давления в контуре, а следовательно и более низкие числа Рейнольдса в теплообменных аппаратах.

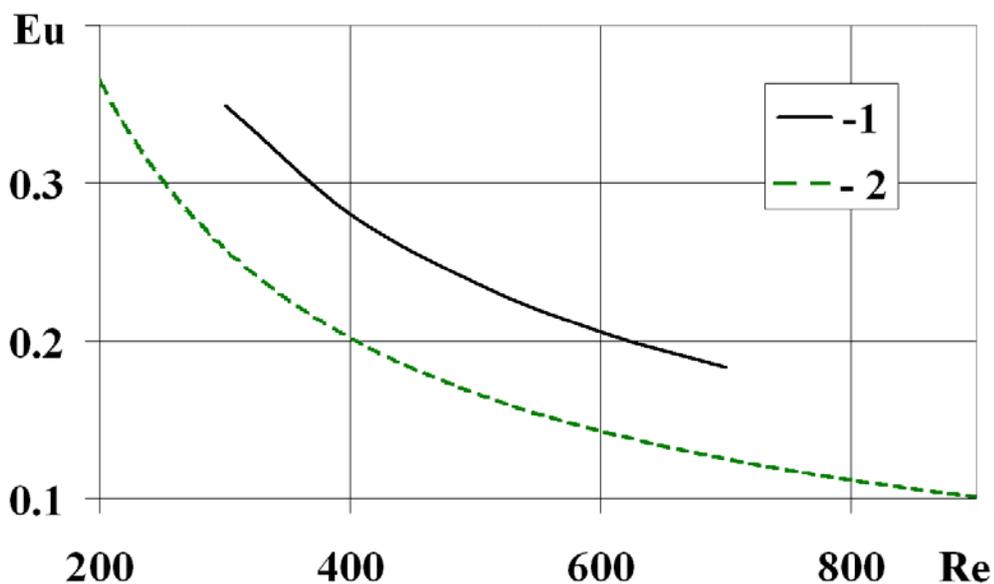


Рисунок 4 – Критериальная зависимость $Eu = f(Re)$ при течении воздуха 1 – поверхность 104 [1], 2 – поверхность МВТУ №9

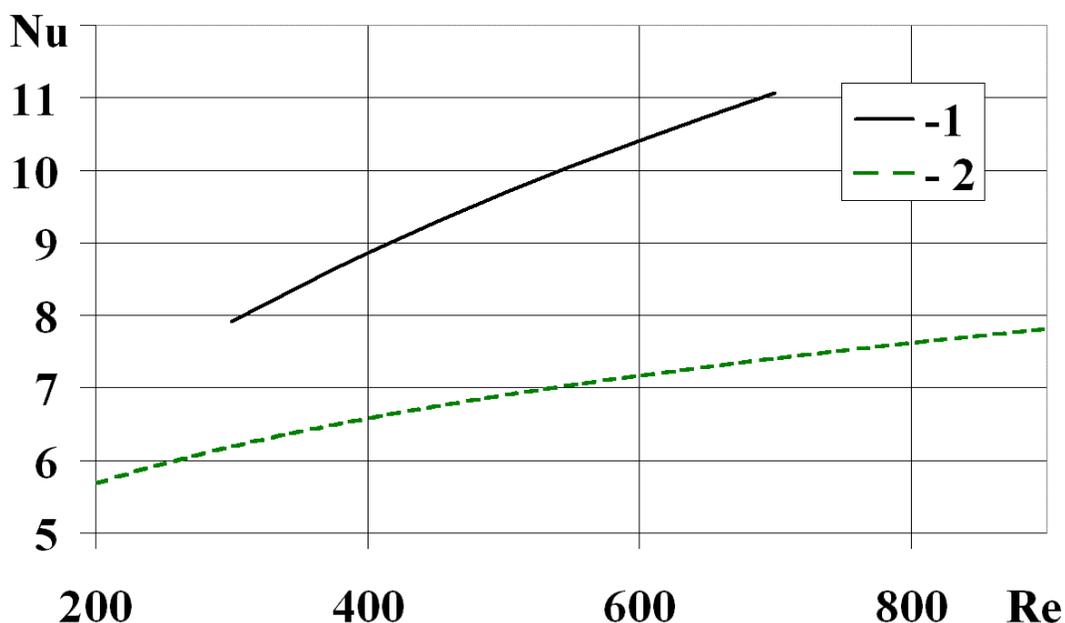


Рисунок 5 – Критериальная зависимость $Nu = f(Re)$ при течении воздуха 1 – поверхность 104 [1], 2 – поверхность МВТУ №9

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК 16.516.11.6112).

5. Список литературы

1. Лондон А.Л., Кейс В.М. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. – 224 с.
2. Li-Zhi Zhang. Heat and mass transfer in plate-fin enthalpy exchangers with different plate and fin materials. Int. Journal of Heat and mass transfer, 52 (2009), pp. 2704–2713.
3. Xing Luo, Wilfried Roetzel. The single-blow transient testing technique for plate-fin heat exchangers. Int. Journal of Heat and mass transfer, 44 (2001), pp. 3745–3753.

4. Sheik Ismail L., Velraj R., Ranganayakulu C. Studies on pumping power in terms of pressure drop and heat transfer characteristics of compact plate-fin heat exchangers - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2010), pp. 478-485.
5. Nusselt W. Die theorie des winderhitzers. *Z. Ver. Dtsche. Ing.* 71 (1927) pp. 85-91.
6. Schumann T.E.W. Heat transfer: A liquid flowing through a porous prism. *J. Franklin Inst.* 208 (1929), pp. 405-416.
7. Hausen H. Uber die theorie des warmeaustausches in regeneratoren. *Z. Angew. Math. Mech.* 9 (1929), pp. 173-200.
8. Пуччи Р.Ф., Хоуард К-П., Пирсолл К.Х. Однопоточный нестационарный метод исследования компактных теплообменных поверхностей // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. А : Энергетические машины и установки. – М.: Мир, 1967. №1. с. 38.

Investigation of characteristics of high-compact plate-fin heat-exchange surfaces with shifted fin

06, June 2012

DOI: 10.7463/0612.0431788

Egorov K.S., Schegolev N.L.

Russia, Bauman Moscow State Technical University
serg7573@pochta.ru

The article presents a research problem of heat and hydraulic characteristics of high-compact plate-fin heat-exchange surfaces. These heat-exchange surfaces are widely used in aerospace applications, space and renewable power generation. The experimental facility and measurement routine are described. The experimental facility has a closed loop, which allows to use it for different working mediums (air, mixtures of inert gases etc.). A transient method of heat research was used. The experimental data for BMSTU №9 surface in the range of Reynolds numbers from 100 to 700 for air is given in the article. Obtained experimental data was compared with the data of Kays and London for surface №104.

Publications with keywords: [heat exchanger](#), [high-compactness heat surface](#), [helium-xenon mixture](#), [Prandtl number](#)

Publications with words: [heat exchanger](#), [high-compactness heat surface](#), [helium-xenon mixture](#), [Prandtl number](#)

References

1. London A.L., Kays W.M. *Compact heat exchangers*. National Press, 1955. (Russ. ed.: London A.L., Keis V.M. *Kompaktnye teploobmenniki*. Moscow, Energiia, 1967. 224 p.).
2. Li-Zhi Zhang. Heat and mass transfer in plate-fin enthalpy exchangers with different plate and fin materials. *Int. Journal of Heat and mass transfer*, 2009, vol. 52, no. 11–1252, pp. 2704–2713.
3. Xing Luo, Wilfried Roetzel. The single-blow transient testing technique for plate-fin heat exchangers. *Int. Journal of Heat and mass transfer*, 2001, vol. 44, no. 19, pp. 3745–3753.

4. Sheik Ismail L., Velraj R., Ranganayakulu C. Studies on pumping power in terms of pressure drop and heat transfer characteristics of compact plate-fin heat exchangers - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, no. 1, pp. 478-485.
5. Nusselt W. Die theorie des winderhitzers [The theory of the winder superheater]. *Z. Ver. Dtsche. Ing.*, 1927, no. 71, pp. 85-91. (in German).
6. Schumann T.E.W. Heat transfer: A liquid flowing through a porous prism. *J. Franklin Inst.*, 1929, no. 208, pp. 405-416.
7. Hausen H. Uber die theorie des warmetausches in regeneratoren [About the theory of heat exchange in regenerators]. *Z. Angew. Math. Mech.*, 1929, no. 9, pp. 173-200. (in German).
8. Puchchi R.F., Khouard K-P., Pirsoll K.X. Odnopotochnyi nestatsionarnyi metod issledovaniia kompaktnykh teploobmennykh poverkhnostei [Single-stream non-stationary method for the investigation of compact heat exchanger surfaces]. *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Ser. A : Energeticheskie mashiny i ustanovki* [Proceedings of the American society of mechanical engineers. Ser. A : Energetic machines and plants]. Transl. from English. Moscow, Mir, 1967, no. 1, p. 38.