

Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик трактов охлаждения камер сгорания с предельными параметрами оребрения энергосиловых установок

© В.П. Александренков, Н.Н. Зубков, Д.А. Ягодников,
Н.Я. Ирьянов, А.В. Сухов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования теплогидравлических характеристик тракта охлаждения камер сгорания тепловых энергетических установок с предельно высокой степенью оребрения, получаемого методом деформирующего резания. Показана работоспособность трактов применительно к задачам охлаждения конструкций высокотемпературных энергоустановок, их надежной теплозащиты даже в условиях пленочного кипения охладителя.

Ключевые слова: кольцевой тракт охлаждения, оребрение камеры сгорания, деформирующее резание, окружное течение, теплогидравлические характеристики.

Введение. При использовании в промышленности тепловых энергоустановок и газопламенных технологий часто возникает проблема теплозащиты высокотемпературных камер сгорания и газогенерирующих устройств энергосиловых установок (ЭСУ), решением которой является интенсификация теплоотдачи (ИТ) в теплообменниках и трактах охлаждения. Наиболее распространенным и перспективным способом ИТ считается развитие теплоотдающей поверхности в сочетании с миниатюризацией характерных геометрических параметров теплообменных поверхностей вплоть до уровня известных пористых структур [1]. Однако существующие технологические возможности производства не всегда удовлетворяют необходимым требованиям к предельному и оптимальному выполнению параметров оребрения.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана оригинальная технология деформирующего резания (ДР), обеспечивающая предельно высокие уровни оребрения с достаточно стабильными геометрическими параметрами [2]. Метод основан на сочетании двух физических процессов — разрушения и целенаправленной пластической деформации материала заготовки. Метод деформирующего резания и инструмент для его реализации запатентованы в России и за рубежом [3].

Процесс ДР (рис. 1, а) заключается в подрезании материала поверхностного слоя главной режущей кромкой и последующей де-

формации подрезанного слоя передней поверхностью инструмента. Вспомогательная кромка инструмента, на которой процесс резания исключен, определяет окончательное положение подрезанного слоя на заготовке. На поверхности формируется развитый рельеф в виде чередующихся ребер (рис. 1, б), представляющих собой стружку, не отделившуюся от заготовки по своей узкой стороне. Установлены взаимосвязи процесса ДР, которые позволили предложить зависимости для аналитического расчета режимов обработки и геометрических параметров инструмента, обеспечивающих получение макрорельефа в виде ребер с заранее заданными геометрическими характеристиками.

В настоящее время метод ДР имеет разнообразные области использования. Основной является интенсификация теплообмена в ЭСУ, причем за счет многократного возрастания площади поверхности, а также особенностей получаемого рельефа, эффективный коэффициент теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью может быть увеличен в несколько раз. Микрооребрение листовых материалов с межреберным зазором в несколько микрометров использовано для получения конструкционных капиллярно-пористых структур тепловых труб [2].

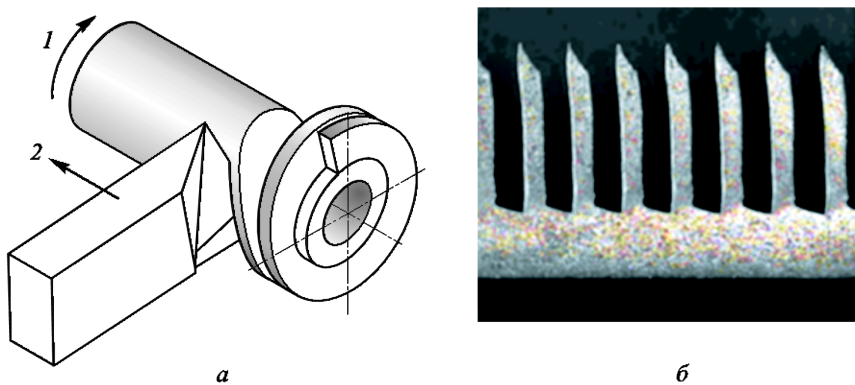


Рис. 1. Схема ДР на трубной заготовке (а) и характерный профиль оребрения, получаемого ДР (б):

1 — главное движение ДР; 2 — движение подачи

На основе двусторонне оребренной трубы создана конструкция оригинального микрощелевого компактного высокоэффективного теплообменника, в котором получаемый ДР-технологией профиль оребрения потребовал принципиально иной схемы организации течения охладителя. Вместо классического продольного (осевого) течения вдоль ребер здесь реализуется окружное течение теплоносителя в межреберных каналах. В конструкции теплообменника использован принцип движения теплоносителя по части окружности. Этот же принцип может быть использован, например, для системы охлажде-

ния камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с двумя подводящими и двумя отводящими осевыми коллекторами, что обеспечивает движение охлаждающего агента по 1/4 части окружности камеры сгорания. На рис. 2 изображена схема, отображающая принцип работы такой системы охлаждения. Стрелками на рисунке обозначены подача и отвод охладителя. Для понимания принципа движения теплоносителя кожух, выполняющий функцию продольных коллекторов, условно сдвинут вдоль оси.

Особенностью такого исполнения тракта охлаждения является организация окружного течения охладителя в межреберных каналах с продольной его раздачей и сбором по всей длине камеры подобно известной схеме межканальной транспирации жидкости через пористый материал [4, 5].

Рассматриваемая технология ДР-оребрения может быть распространена и на решение других задач в области теплозащиты конструкций высокотемпературных энергоустановок и теплообменных аппаратов.

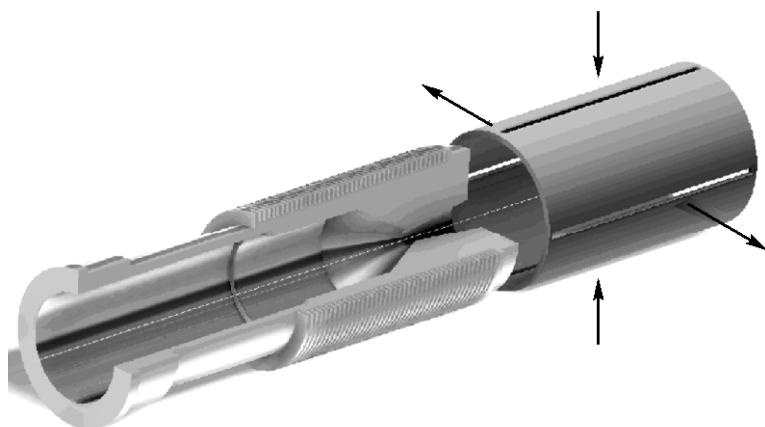


Рис. 2. Схема охлаждения камеры ЖРД на основе оребрения, полученного по технологии ДР

Ввиду особенностей исполнения такого оребрения, его геометрических параметров, качества поверхности, схемы течения и т. п., следует ожидать своеобразного характера протекающих теплообменных процессов, температурного состояния конструкции, а также зависимостей теплогидравлических характеристик (ТГХ) выполняемых трактов от режимов нагрева и охлаждения. Эти обстоятельства обусловили необходимость экспериментального исследования подобных трактов. Целью данной работы является определение ТГХ для ДР-трактов и подтверждение возможности их применения для теплозащиты конструкций ЭСУ и теплообменных аппаратов.

Конструкция камеры сгорания ЭСУ и методика эксперимента. Конструкция экспериментальной модели камеры ЭСУ состоит из двух независимо охлаждаемых частей: газогенератора и соплового блока, необходимого для обеспечения требуемого давления (рис. 3). Объектом исследования является элемент кольцевого тракта охлаждения цилиндрического типа, выполненный по технологии ДР.

Данный элемент образован двумя деталями: огневой стенкой цилиндрической камеры сгорания 1, выполненной из меди марки М2, и наружной оболочкой 2 с двумя продольными подводщими и двумя коллекторными отводящими каналами и встроен в корпус 3 автономно охлаждаемой газогенераторной камеры сгорания в совокупности с форсуночной головкой 4 и форкамерой 5. Последовательно к камере сгорания пристыкован сопловой блок 6.

Схема подачи, течения и сбора охладителя в тракте, выполненного по технологии ДР, представлена на рис. 4. Здесь длина пути течения охладителя l определяется средним диаметром тракта и количеством раздающих (подводящих) и собирающих (отводящих) коллекторных каналов, которое в свою очередь определяется условием максимального увеличения эффективной теплоотдачи в коротких каналах и ограничивается конструктивным и технологическим соображениями. В нашем случае длина пути l составляла $\frac{1}{4}$ длины окружности.

Характерные значения геометрических параметров теплообменного устройства следующие: длина кольцевого тракта охлаждения $L = 49$ мм, диаметр огневой поверхности $D_1 = 16$ мм, внутренний диаметр тракта $D_2 = 21$ мм, высота ребра $h_p = 1,5$ мм, шаг оребрения $t_p = 0,4$ мм, толщина ребра $\delta_p = 0,2$ мм.

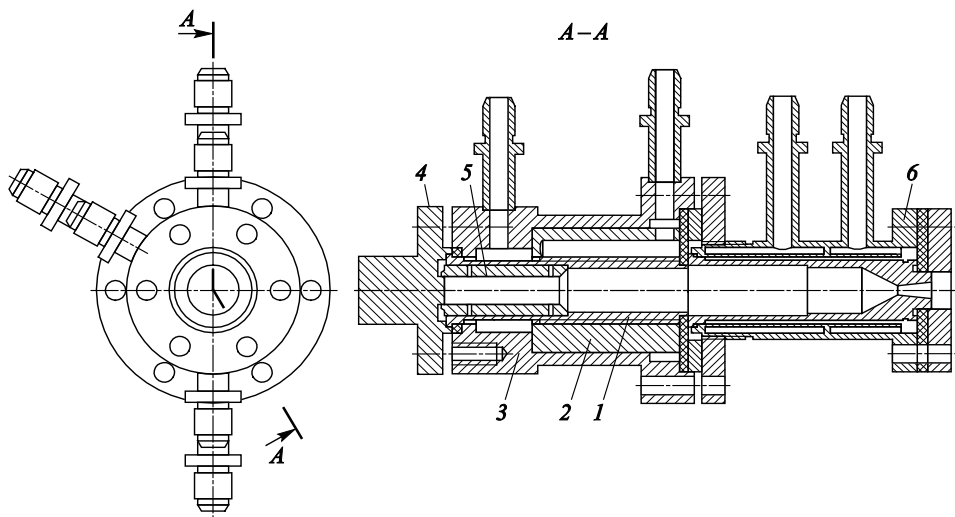


Рис. 3. Схема экспериментальной модели:

1 — огневая стенка; 2 — наружная оболочка; 3 — корпус газогенераторной части; 4 — форсуночная головка; 5 — форкамера; 6 — сопловой блок

В качестве топлива использовали газообразные метан и кислород. Подачу кислорода осуществляли по центральному каналу форкамеры, метана — по наружным продольным пазам и дозировали двумя полосами радиальных отверстий так, что фронт пламени формировался в выходном сечении форкамеры. Воспламенение топлива выполняли электроискровым способом. В качестве охладителя использовали техническую воду. Экспериментальные исследования проводили на стендовом оборудовании, описание которого приведено в [6].

Режим нагрева регулировали расходом топлива при коэффициенте избытка окислителя $\alpha_0 = 0,5 \dots 0,9$, что обеспечивало термодинамическую температуру продуктов сгорания (ПС) $T_{0г} = 2600 \dots 3300$ К, рассчитываемую с использованием программного комплекса «Терра» [7]. Режим охлаждения регулировали расходом охладителя $\dot{m}_{охл} = 20 \dots 100$ г/с.

В процессе испытаний измеряли также другие величины:

- расходы компонентов топлива. Диапазон изменения для окислителя $\dot{m}_o = 1,4 \dots 1,9$ г/с, для горючего $\dot{m}_г = 0,5 \dots 0,9$ г/с. Соотношение компонентов $k_m = m_o/m_г$ составляло $2,0 \dots 3,6$;

- перепад давления в охладителе на входе и на выходе из газогенераторной части модели камеры, включающий потери на трение в тракте и потери на местных сопротивлениях. Диапазон изменения $\Delta p_{охл} = \pm 0,1$ МПа;

- давление в камере сгорания $p_k = 0,6$ МПа;

- температуру охладителя. На входе $t_{вх} \approx 20$ °С, на выходе $t_{вых} \approx 30 \dots 60$ °С.

Регистрация показаний приборов осуществлялась автоматически аппаратно-программным комплексом «МІС-300М» в реальном масштабе времени по значениям установившихся показаний в пределах продолжительности испытаний $20 \dots 30$ с.

Ввиду очевидных проблем прямого измерения температуры стенки ее значение определяли расчетным путем по балансу полных тепловых потоков Q на всех трех поверхностях теплообмена по изложенной в [8] методике с учетом кривизны тракта методом последовательных приближений следующим образом. Температуру горячей поверхности стенки $T_{ст1}$ определяли из соотношения действительных q и некоторых условных $q_{усл}$ удельных тепловых потоков по конвективной составляющей на стороне ПС, рассчитываемых при постоянном коэффициенте теплоотдачи α_r (коэффициент теплоотдачи от газа к стенке камеры сгорания) по условной температуре стенки

$$T_{усл}: q / q_{усл} = \frac{T_{0г} - T_{ст1}}{T_{0г} - T_{усл}}.$$

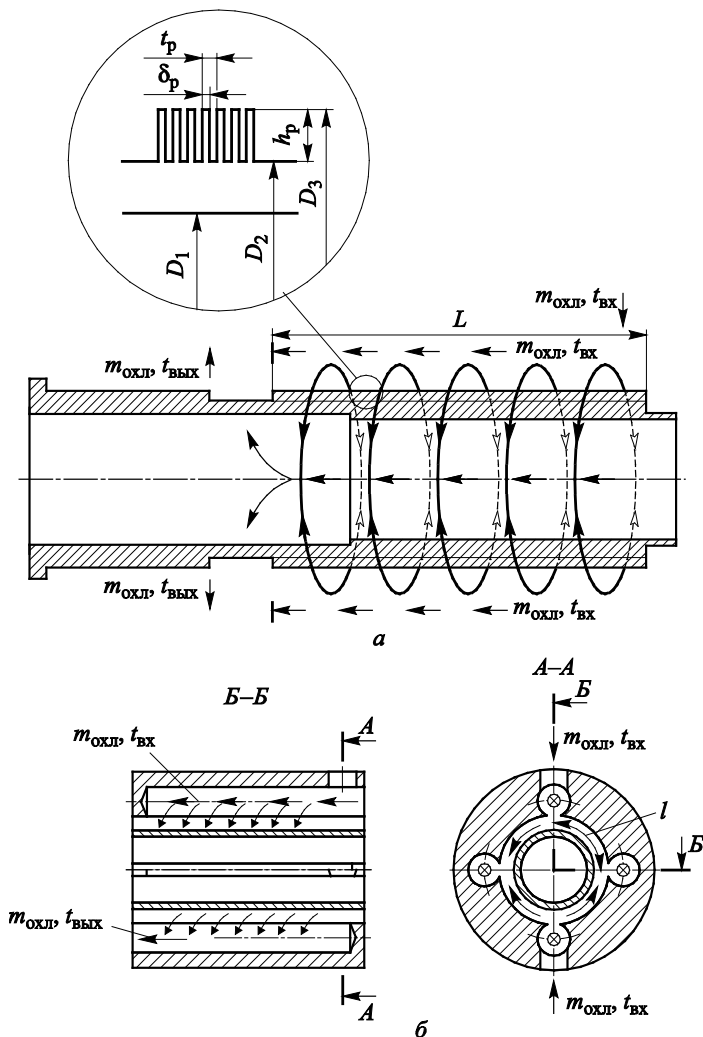


Рис. 4. Схема тракта охлаждения модельной камеры сгорания:
 а — огневая стенка; б — наружная оболочка

Так, для относительно тонких цилиндрических оболочек умеренной степени кривизны ($D_2/D_1 < 2$) в одномерной постановке балансовое уравнение соотношений действительных и некоторых условных значений конвективных тепловых потоков по двум сторонам стенки может быть представлено в виде

$$\frac{T_{0г} - T_{ст1}}{T_{0г} - T_{усл}} = \left(\frac{T_{ст1} - T_{охл}}{\frac{1}{\alpha_2} \frac{F_1}{F_2} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} \frac{F_1}{F_{ст}}} - q_{л1} \right) \frac{1}{q_{усл}}$$

Здесь F_i — площадь соответствующей теплоотдающей поверхности; $\alpha_{\text{охл.эф}}$ — эффективный коэффициент теплоотдачи в охладителе; $\lambda_{\text{ст}}$, $\delta_{\text{ст}}$ — теплопроводность и толщина стенки соответственно; $q_{\text{л}}$ — лучистый тепловой поток; индексы 1, 2 относятся к горячей и холодной сторонам стенки соответственно; индекс «ст» относится к средним значениям для стенки.

Аналитическим решением этого уравнения является следующая формула:

$$T_{\text{ст1}} = \frac{\left(\frac{T_{0\text{г}}}{T_{0\text{г}} - T_{\text{усл}}} + \frac{T_{\text{охл}}}{\left[(\delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}}) \frac{F_1}{F_{\text{ст}}} + (1 / \alpha_{\text{охл.эф}}) \frac{F_1}{F_2} \right] q_{\text{усл}}} + \frac{q_{\text{л1}}}{q_{\text{усл}}} \right)}{\frac{1}{T_{0\text{г}} - T_{\text{усл}}} + \frac{1}{\left[(\delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}}) \frac{F_1}{F_{\text{ст}}} + (1 / \alpha_{\text{охл.эф}}) \frac{F_1}{F_2} \right] q_{\text{усл}}}}$$

Алгоритм итерационного процесса расчета температуры стенки путем последовательных приближений следующий. Располагая исходными данными о геометрии объекта экспериментального исследования и его термодинамических характеристиках, а также опытными данными физического эксперимента, определяем удельные тепловые потоки q_1 и среднее арифметическое значение температуры охладителя $T_{\text{охл}}$.

Температура ПС $T_{0\text{г}}$ достаточно точно определяется термодинамическим расчетом, например по режимным параметрам с помощью программного комплекса «Терра».

Лучистый тепловой поток рассчитывали по формуле

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{ст.эф}} \varepsilon_{\text{г}} \sigma_o \left(\frac{T_{0\text{г}}}{100} \right)^4,$$

где $\varepsilon_{\text{г}}$ — излучательная способность ПС, определяемая по параметрам газа; $\varepsilon_{\text{ст.эф}} = 0,5(1 + \varepsilon_{\text{ст}})$ — эффективная степень черноты стенки, $\varepsilon_{\text{ст}}$ — степень черноты стенки, которая составляла 0,8 [9].

Коэффициент теплоотдачи в тракте охлаждения как эффективная искомая величина в текущих приближениях определяется зависимостью

$$\alpha_{\text{охл.эф}} = \frac{q_2}{(T_{\text{ст2}} - T_{\text{охл}})},$$

где температура на холодной стороне стенки $T_{\text{ст2}}$ оценивается по формуле

$$T_{ст2} = T_{ст1} - \frac{q_{ст} \delta_{ст}}{\lambda_{ст}},$$

причем в качестве первого приближения принимается $T_{ст1} = T_{усл}$.

В качестве $q_{усл}$ принимается определяемый из эксперимента удельный тепловой поток на горячей стороне стенки за вычетом лущистой составляющей:

$$q_{усл} = q_1 - q_{л1} = q_1 (1 - q_{л1} / q_1).$$

Задав произвольное значение $T_{усл}$ и проведя по нему оценку на первом шаге $T_{ст2}$ и $\alpha_{охл.эф}$, решают задачу по определению температуры $T_{ст1}$ на ее сходимость с $T_{усл}$, а также на сходимость $\alpha_{охл.эф}$.

Удельные тепловые потоки определяли как сосредоточенные величины по подогреву охладителя $\delta t_{охл} = t_{вых} - t_{вх}$ по формуле

$$q_i = Q / F_i = (\dot{m}_{охл} c_{pохл}) (t_{вых} - t_{вх}) / F_i,$$

где $F_i = \pi D_i L$ — площадь соответствующей поверхности стенки; $c_{pохл}$ — теплоемкость охладителя, определяемая по среднеарифметической температуре стенки. Средние значения параметров стенки определяли на среднем диаметре стенки $D_{ст.ср} = 0,5 (D_1 + D_2)$.

Анализ результатов эксперимента. По результатам первичной обработки данных эксперимента для разных режимов нагрева ($\alpha_0 = 0,52 \dots 0,9$) и охлаждения ($\dot{m}_{охл} = 20 \dots 70$ г/с) тепловая мощность Q испытываемой модели составила 1,5...2,3 кВт. Удельные тепловые потоки на горячей стороне стенки составили 0,74...1,25 МВт/м². Термодинамическая температура газа в камере сгорания изменялась в диапазоне 2800...3300 К, расчетная температура стенки со стороны охладителя $T_{ст2}$ составила от 420...435 К.

Вторичная обработка данных эксперимента заключалась в расчете ТГХ. Коэффициент теплоотдачи как эффективную сосредоточенную величину определяли косвенным расчетно-экспериментальным методом по подогреву охладителя $\delta t_{охл} = t_{вых} - t_{вх}$ и температурному напору $\Delta t = T_{ст2} - T_{охл}$:

$$\alpha_{охл.эф} = \frac{q_2}{\Delta t} = \frac{Q}{F_2 (T_{ст2} - T_{охл})} = \frac{m_{охл} c_p \delta t_{охл}}{F_2 (T_{ст2} - T_{охл})}.$$

Этот коэффициент относится к номинальной наружной поверхности огневой стенки F_2 , рассчитанной по основанию ребер.

Число Нуссельта было рассчитано по формуле $Nu_{охл.эф} = \frac{\alpha_{охл.эф} d_{г}}{\lambda_{охл}}$, где $d_{г}$ — гидравлический диаметр, который

определяли по проектным значениям геометрии единичного межреберного канала, $d_{\Gamma} = \frac{2(t_p - \delta_p)h_p}{(t_p - \delta_p) + h_p}$ (т. е. $d_{\Gamma} = 4f/\Pi$), и представлено в зависимости от числа Re на рис. 5 для разных режимов нагрева.

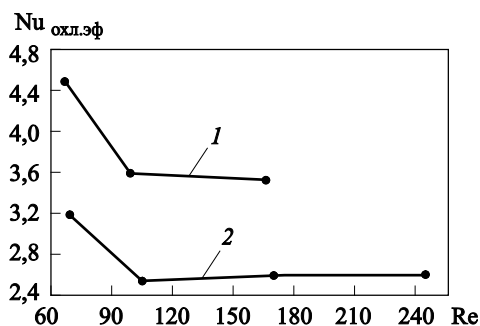


Рис. 5. Зависимость теплоотдачи в тракте охлаждения от режима течения охладителя (числа Re) и нагрева:

$$1 - \alpha_0 = 0,52; 2 - \alpha_0 = 0,86$$

Числа Рейнольдса и Прандтля определяли по формулам $Re = \frac{\rho u \cdot d_{\Gamma}}{\mu}$ и $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ соответственно.

Теплофизические свойства охладителя — теплоемкость c_p , коэффициент динамической вязкости μ , коэффициент теплопроводности λ — рассчитывали по среднеарифметическому значению температуры охладителя; среднемассовую скорость ρu вычисляли по живому сечению окружного течения охладителя на четверти окружности:

$$(\rho u)_{\text{охл}} = \frac{\dot{m}_{\text{охл}}}{4f_{\text{охл}}}$$

Проходную площадь течения рассчитывали по формуле $f_{\text{охл}} = (t_p - \delta_p)h_p n_p$, где $n_p = L/t_p$.

Коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_{\text{охл}}$ определяли по общепринятой зависимости

$$\xi_{\text{охл}} = \frac{2\Delta p_{\text{охл}} \rho_{\text{охл}} d_{\Gamma}}{(\rho u)_{\text{охл}}^2 l},$$

где длину пути l течения охладителя на каждой четверти окружности вычисляли по среднему диаметру тракта. Результаты гидравлических испытаний представлены на рис. 6.

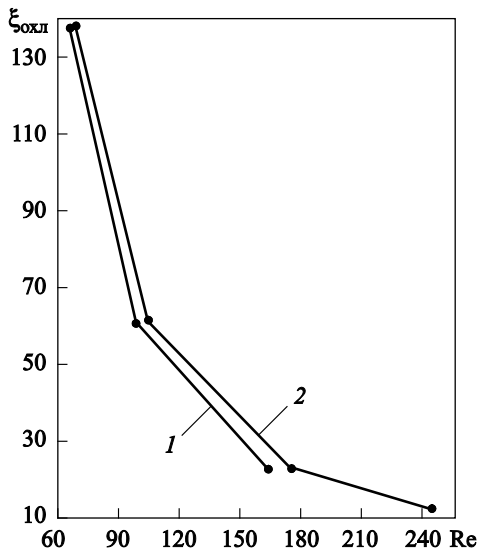


Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от режима течения охладителя и его нагрева:
 1 — $\alpha_0 = 0,52$; 2 — $\alpha_0 = 0,86$

Анализ ТГХ испытуемого ДР-тракта в исследованном диапазоне параметров показывает их существенную качественную и количественную зависимость от режима течения охладителя и режима его нагрева, последнее особенно заметно влияет на число Нуссельта. Эту зависимость можно объяснить фактором возникающего пленочного кипения с вероятным режимом кризиса кипения, что подтверждается расчетной температурой стенки, когда превышение температурного напора между стенкой и охладителем больше критического в несколько раз, а также и самой достаточно низкой величиной $Nu_{охл.эф.}$

Выводы. В результате проведенного исследования установлено, что использованный метод охлаждения работоспособен, так как обеспечивает надежную теплозащиту конструкции камеры сгорания. Следовательно, технология ДР может быть предложена к реализации при создании трактов охлаждения ЭСУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для ЖРД. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 66, с. 74–81.
- [2] Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев. *Новости теплоснабжения*, 2005, № 4, с. 51–53.

- [3] Zoubkov N.N. (РФ), Ovtchinnikov A.I. (РФ). *Method and apparatus producing a surface with alternating ridges and depressions*. Pat. 5775187 USA, Int. Cl. B23B 17/00. № 545640. 1998.
- [4] Попов И.А., Щелчков А.В., Зубков Н.Н., Лэй Р.А., Гортышов Ю.Ф. Теплоотдача при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2014, № 4, с. 49–53.
- [5] Пелевин Ф.В., Авраамов Н.И., Орлин С.А., Синцов А.Л. Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-698
- [6] Ягодников Д.А., Антонов Ю.В., Ворожеева О.А., Масальский Н.Л., Новиков А.О., Чертков К.О. Экспериментальное исследование рабочего процесса газогенератора кислород-метанового ракетного двигателя. *Инженерный вестник*, 2014, № 10. URL: <http://engsi.ru/doc/739755.html>
- [7] Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 1, с. 21. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31
- [8] Кудрявцев В.М., ред. *Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей*. 4-е изд. В 2 т. Т. 2. Москва, Высшая школа, 1993, 703 с.
- [9] Григорьев Е.З., Мейлихов И.С., ред. *Физические величины*. Москва, Энергоатомиздат, 1991, 1000 с.

Статья поступила в редакцию 26.08.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александренков В.П., Зубков Н.Н., Ягодников Д.А., Ирьянов Н.Я. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик тракторов охлаждения камер сгорания с предельными параметрами оребрения энергосиловых установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-10-1545>

Александренков Владислав Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: aleks@bmstu.ru

Зубков Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Ирьянов Николай Яковлевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сухов Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ягодников Дмитрий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: daj@bmstu.ru

Experimental study of thermal-hydraulic characteristics of combustion chamber cooling channels with critical propulsion plant ribbing parameters

© V.P. Aleksandrenkov, N.N. Zubkov, D.A. Yagodnikov, N.Ya. Iryanov, A.V. Sukhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents results of an experimental investigation studying thermal-hydraulic characteristics of combustion chamber cooling channels found in thermal propulsion plants characterised by a critically high ribbing level generated via deformational cutting technique. We show that these channels are operationally efficient when it comes to cooling high-temperature propulsion plant structures and provide reliable thermal shielding for said structures even in the case of film boil occurring in the coolant.

Keywords: circular cooling channel, combustion chamber ribbing, deformational cutting, rotational flow, thermal-hydraulic characteristics.

REFERENCES

- [1] Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 66, pp. 74–81.
- [2] Zubkov N.N. *Novosti teplosnabzheniya — Heat Supply News*, 2005, no. 4, pp. 51–53.
- [3] Zoubkov N.N. (RU), Ovtchinnikov A.I. (RU). *Method and apparatus producing a surface with alternating ridges and depressions*. Pat. 5775187 USA, Int. Cl. B23B 17/00, no. 545640, 1998.
- [4] Popov I.A., Shchelchikov A.V., Zubkov N.N., Ley R.A., Gortyshov Yu.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2014, no. 4, pp. 49–53.
- [5] Pelevin F.V., Avraamov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-698
- [6] Yagodnikov D.A., Antonov Yu.V., Vorozheeva O.A., Masalskiy N.L., Novikov A.O., Chertkov K.O. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 10. Available at: <http://engsi.ru/doc/739755.html>
- [7] Trusov B.G. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 1, pp. 21. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-1-31
- [8] Kudryavtsev V.M., ed. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Foundations of liquid rocket engine theory and parameter calculation]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1993, 703 p.
- [9] Grigorev E.Z., Meylikhov I.S., ed. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1000 p.

Aleksandrenkov V.P., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: aleks@bmstu.ru

Zubkov N.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Tooling Equipment and Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Yagodnikov D.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: daj@bmstu.ru

Iryanov N.Ya., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University.

Sukhov A.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University.