

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ РАБОЧИХ ТЕЛ В ВЫПОЛНЕННОМ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ АГРЕГАТЕ НАДДУВА

© 2022

А. С. Смекалкин – руководитель группы теплообмена и гидравлики расчётно-теоретического отдела;
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», г. Химки;
Smekalkin_as@mail.ru

А. В. Иванов – доктор технических наук, заместитель главного конструктора по науке и новым технологиям;
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», г. Химки;
Iav308@inbox.ru

Агрегат наддува предназначен для нагрева рабочего тела (газообразный гелий или газообразный азот), поступающего на наддув топливных баков окислителя и горючего ракетного двигателя. Нагрев рабочего тела осуществляется генераторным газом, отбираемым после турбины. По аддитивной технологии создан агрегат наддува с повышенной шероховатостью поверхности в каналах. Высокая шероховатость – одна из особенностей изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления. Проведено исследование влияния шероховатости поверхности каналов на коэффициент теплоотдачи. Рассматривается методика расчёта теплоотдачи генераторного газа и газообразного азота, а также результаты теплопередачи как с учётом, так и без учёта шероховатости поверхности каналов агрегата наддува, выполненного по аддитивной технологии. На стендовой базе АО «НПО Энергомаш» проведены огневые испытания данного теплообменного аппарата. Сравняются расчётные и экспериментальные значения температур рабочих тел на выходе из агрегата наддува.

Агрегат наддува; аддитивные технологии; шероховатость поверхности каналов; теплоотдача

Цитирование: Смекалкин А.С., Иванов А.В. Влияние шероховатости поверхности на коэффициент теплоотдачи рабочих тел в выполненном по аддитивной технологии агрегате наддува // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 109-114. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-109-114

Введение

Определение температуры поверхности теплопередающей стенки, необходимой для расчёта температурного напора и коэффициента теплоотдачи, является сложной и ответственной задачей. Основной вопрос, который возникает при таком расчёте: Как шероховатость поверхности влияет на коэффициент теплоотдачи одного рабочего тела к другому рабочему телу через стенку? Ранее подобная проблема не возникала в расчётах теплопередачи агрегата наддува, т.к. шероховатость в каналах не учитывалась и их внутренние стенки считались гладкими.

Существенной особенностью изготовления агрегата наддува с применением аддитивной технологии является повышенная, по сравнению с традиционными способами изготовления, шероховатость внутренних поверхностей каналов, влияющая на коэффициент теплоотдачи. Повышенная шероховатость поверхности с точки зрения теплообмена оказывает двойное воздействие: большое термическое сопротивление ухудшает теплообмен, при этом турбулизация потока улучшает теплообмен.

Из теории турбулентности известно, что шероховатость поверхности влияет на теплообмен и гидравлическое сопротивление лишь в том случае, если высота выступов шероховатости выходит за пределы ламинарного подслоя [1]. Данное условие можно определить следующей формулой:

$$\frac{\delta_{ш} \sqrt{\frac{\xi}{8}} \omega}{\mu} > 5,$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; μ – кинематическая вязкость рабочего тела; ω – средняя скорость рабочего тела; $\delta_{ш}$ – высота выступов шероховатости.

В статье представлена методика расчёта теплоотдачи генераторного газа и газообразного азота, а также результаты теплопередачи как с учётом шероховатости поверхности, так и без учёта шероховатости поверхности каналов агрегата наддува, выполненного по аддитивной технологии.

Постановка задач

Агрегат наддува предназначен для нагрева газообразного азота, поступающего на наддув топливных баков окислителя и горючего ракетного двигателя. Нагрев азота осуществляется газом, отбираемым после турбины. Агрегат наддува (рис. 1) представляет собой систему каналов, расположенных в «шахматном» порядке. По одним каналам идет генераторный газ (греющий газ), по другим – азот (нагреваемый газ). Схема течения компонентов – противоток. Материал, из которого изготовлен теплообменный аппарат, никелевый сплав ЭП648ПС [2].

В процессе исследования влияния шероховатости на теплообмен были сформулированы следующие основные задачи:

1. Исследовать влияние шероховатости на коэффициент теплоотдачи.
2. Описать методику расчёта коэффициента теплоотдачи, учитывая шероховатость.
3. Провести испытания агрегата наддува и сравнить температуры рабочих тел на выходе из агрегата наддува с расчётными значениями. Расчётные температуры определить, используя методику расчёта коэффициента теплоотдачи, учитывающую шероховатость поверхности в агрегате наддува.

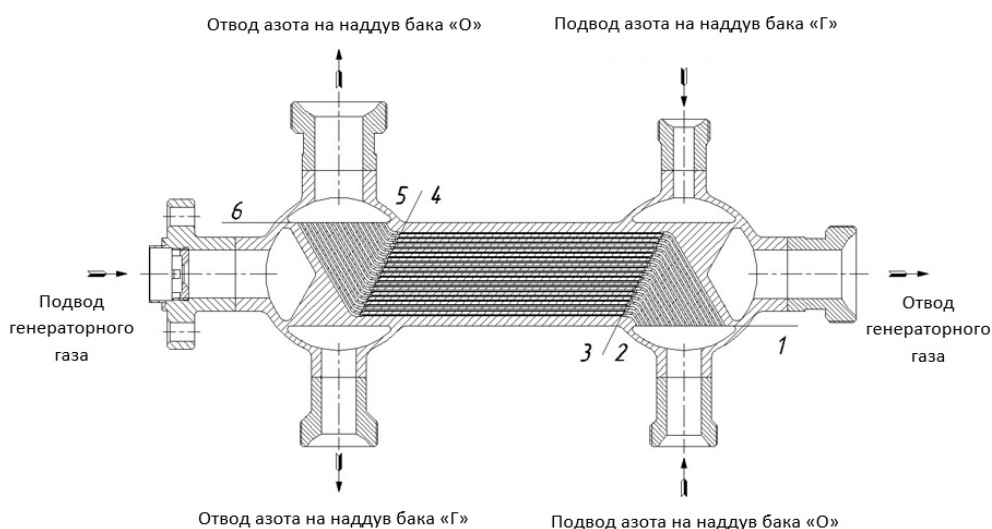


Рис. 1. Схема агрегата наддува. Сечения для расчёта обозначены от 1 до 6

Особенность теплоотдачи в малоразмерных трубках и каналах состоит в том, что даже незначительная шероховатость может оказывать существенное воздействие на

теплообмен. Это происходит вследствие того, что на теплообмен влияет не абсолютная высота выступов шероховатости $\delta_{ш}$, а отношение её к гидравлическому диаметру $d_{эКВ}$:

$$\delta_3 = \frac{\delta_{ш}}{d_{эКВ}}.$$

Высота выступов в агрегате наддува, выполненного по аддитивной технологии, находится в диапазоне от 15 до 20 мкм, что составляет 1/3 от размера гранулы применяемого порошка ЭП648ПС. Такая высокая шероховатость поверхности возникает по причине изготовления агрегата наддува при помощи селективного лазерного сплавления.

Методика расчёта коэффициента теплоотдачи с учётом шероховатости

Коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности вычисляется по формуле:

$$\alpha_r = \frac{Nu \lambda_{N_2}}{d_{эКВ}},$$

где Nu – число Нуссельта; λ_{N_2} – коэффициент теплопроводности азота; $d_{эКВ}$ – гидравлический диаметр.

Для приближённого расчёта можно допустить, что коэффициент теплоотдачи прямо пропорционален относительной высоте выступов шероховатости, что выражается следующей формулой:

$$\alpha_{ш} = f(\alpha_r, K, \delta_3),$$

где $\alpha_{ш}$ – коэффициент теплоотдачи для шероховатой поверхности; K – коэффициент пропорциональности; δ_3 – эквивалентная относительная величина шероховатости.

По данным исследований, проведённым в АО «НПО Энергомаш», коэффициент пропорциональности K определяет отношение коэффициента теплоотдачи для шероховатой поверхности к коэффициенту теплоотдачи для гладкой поверхности. Коэффициент теплоотдачи прямо пропорционален высоте выступов шероховатости. Исследования проводились на стальных трубках с разной шероховатостью, рассматривалось влияние относительной шероховатости труб на теплоотдачу к турбулентному потоку жидкости.

С использованием описанной выше методики расчёта коэффициента теплоотдачи с учётом шероховатости поверхности проведён расчёт теплопередачи в агрегате наддува, изготовленного по аддитивной технологии. На стендовой базе АО «НПО Энергомаш» проведены огневые испытания данного агрегата. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных значений температур рабочих тел на выходе из агрегата наддува.

Результаты расчёта теплопередачи и сравнение с экспериментальными данными

В табл. 1, 2 представлены результаты расчёта теплопередачи без учёта шероховатости поверхности и с учётом шероховатости поверхности агрегата наддува. В табл. 3 приведены результаты экспериментальных значений температур на выходе из агрегата наддува (компоненты рабочих тел: азот – генераторный газ).

Таблица 1. Результаты расчёта теплопередачи агрегата наддува без учёта шероховатости поверхности

Наименование	Номера сечений					
	1	2	3	4	5	6
Коэффициент теплоотдачи азота, ккал/(м ² ·ч·град)	4126	3795	3610	3353	3525	3460
Коэффициент теплоотдачи генераторного газа, ккал/(м ² ·ч·град)	1237	1240	1082	1084	1243	1260
Температура азота на выходе из агрегата наддува, К	282,3	383	383	454	454	524
Температура генераторного газа на выходе из агрегата наддува, К	760	732	732	713	713	695

Таблица 2. Результаты расчёта теплопередачи в агрегате наддува с учётом шероховатости поверхности

Наименование	Номера сечений					
	1	2	3	4	5	6
Коэффициент теплоотдачи азота, ккал/(м ² ·ч·град)	6189	5692	5276	4901	5287	5190
Коэффициент теплоотдачи генераторного газа, ккал/(м ² ·ч·град)	1844	1849	1546	1549	1853	1879
Температура азота на выходе из агрегата наддува, К	282,3	413	413	497	497	575
Температура генераторного газа на выходе из агрегата наддува, К	760	723	723	701	701	680

Таблица 3. Результаты экспериментальных данных

Температура азота на выходе из агрегата наддува, К	567
Температура генераторного газа на выходе из агрегата наддува, К	663

На рис. 2 представлен график температур азота на выходе агрегата наддува (табл. 1 – 3). Как видно из графика, наблюдается хорошая сходимость результатов расчёта теплопередачи с учётом шероховатости поверхности и экспериментальных данных. Подогрев рабочего тела (азота) по расчёту на 8 градусов выше, чем подогрев, полученный после огневых испытаний. Описанную выше методику расчёта коэффициента теплоотдачи, учитывающую высокую шероховатость поверхности, можно использовать для расчёта теплопередачи агрегата наддува, выполненного по аддитивной технологии. Небольшое расхождение результатов можно объяснить тем, что в расчётах не учитывался теплообмен агрегата наддува с окружающей средой.

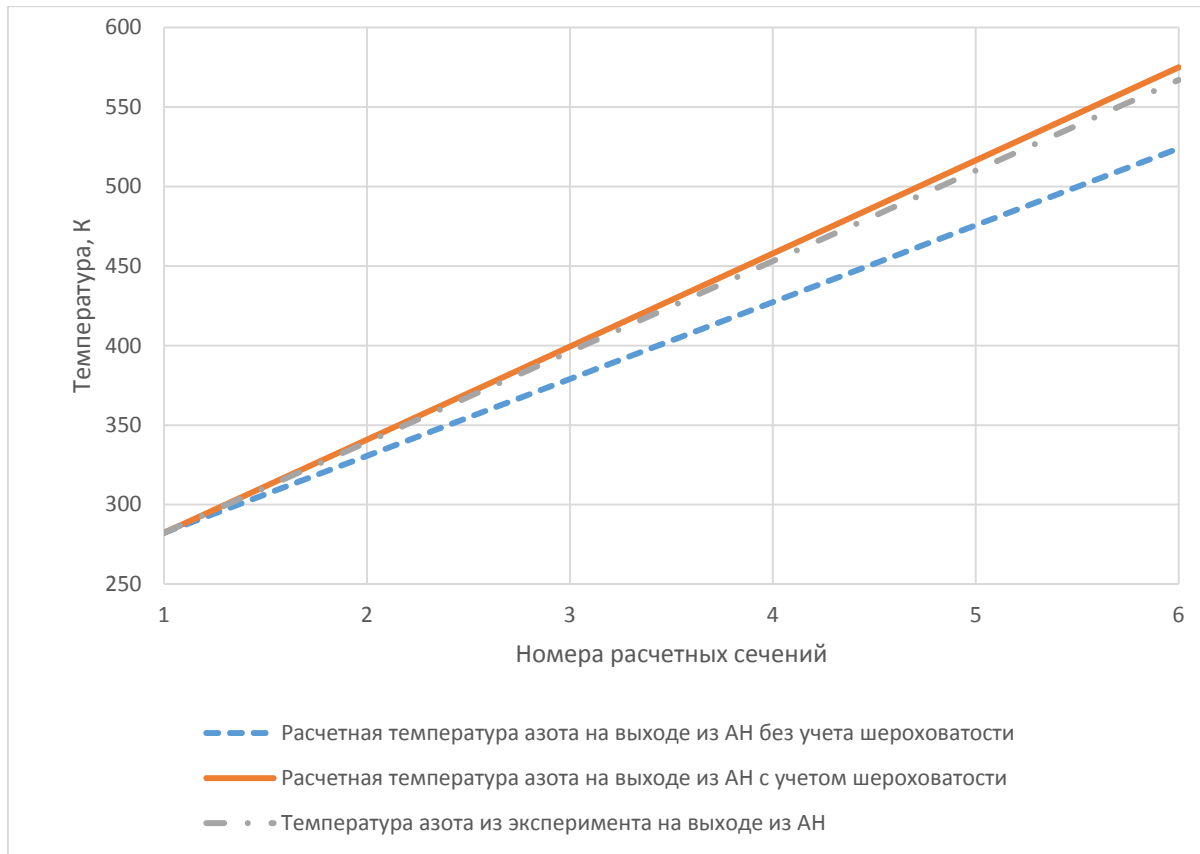


Рис. 2. График температур азота в агрегате наддува

Заключение

Исходя из результатов расчёта и проведённого эксперимента, можно сделать вывод, что с увеличением шероховатости стенки теплоотдача повышается, соответственно рабочее тело (азот) нагревается интенсивнее. Расчётная температура азота на выходе из агрегата наддува равна 575 К. По сравнению с экспериментальными данными температура азота на выходе из агрегата наддува на 8 градусов ниже и составляет 567 К. В процентном соотношении погрешность при расчёте составляет ~3%.

Способ расчёта коэффициента теплоотдачи с учётом шероховатости поверхности, описанный в статье, позволяет получить точные результаты температуры рабочих тел на выходе из агрегата наддува. Результаты расчёта теплопередачи на выходе из агрегата наддува удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальных данных.

Высокая шероховатость в каналах, полученная при помощи использования технологии селективного лазерного сплавления, позволяет создать компактный и эффективный теплообменный аппарат.

Библиографический список

1. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
2. Белов Е.А., Иванов А.В., Иванов Н.Г., Кашапов М.А., Климов В.Ю., Левочкин П.С., Ромасенко Е.Н., Неруш С.В. Применение технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) для изготовления теплообменников систем наддува баков ракет-носителей // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. 2018. № 35. С. 93-105.

INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS ON THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF FLUIDS IN AN ADDITIVELY MANUFACTURED SUPERCHARGER

© 2022

A. S. Smekalkin Leader of the Group of Heat Exchange and Hydraulics of the Theoretical and Computational Department;
JSC NPO Energomash, Khimki, Russian Federation;
smekalkin_as@mail.ru

A. V. Ivanov Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Deputy Chief Designer for Science and New Technologies;
JSC NPO Energomash, Khimki, Russian Federation;
iav308@inbox.ru

The supercharger is intended for heating a fluid (gaseous helium or gaseous nitrogen) used for the pressurization of fuel tanks of oxidizer and propellant of a rocket engine. The fluid is heated with the generator gas downstream the turbine. A supercharger with increased channel surface roughness was made according to an additive technology. High roughness is one of the features of producing parts by selective laser melting. The article presents a method of calculating the heat transfer of generator gas and nitrogen, as well as the results of heat transfer both with and without account of the surface roughness in the channels of the liquid-propellant engine's additively manufactured supercharger. Firing tests were carried out at the research base of NPO Energomash JSC. The calculated and experimental values of the temperature of the working medium at the outlet of the supercharger are compared.

Supercharger; additive technologies; channel surface roughness; heat exchange

Citation: Smekalkin A.S., Ivanov A.V. Influence of surface roughness on the heat transfer coefficient of fluids in an additively manufactured supercharger. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 109-114. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-109-114

References

1. Kovalenko L.M., Glushkov A.F. *Teploobmenniki s intensivatsiey teplootdachi* [Heat exchangers with heat transfer intensification]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986. 240 p.
2. Belov E.A., Ivanov A.V., Ivanov N.G., Kashapov M.A., Klimov V.Y., Levochkin P.S., Romasenko E.N., Nerush S.V. Use of technology of selective laser melting (SLM) for manufacture of heat exchangers of launch-vehicles tank pressurization systems. *Trudy NPO Energomash*. 2018. No. 35. P. 93-105. (In Russ.)