

ВОПРОС УЛУЧШЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: в статье описан эффект повышенной шероховатости внутренних поверхностей каналов охлаждения камер сгорания жидкостных ракетных двигателей, который влияет на теплообмен между хладагентом и стенкой канала, однако это влияние может быть как положительным, так и отрицательным. Для прогнозирования процесса автором приведён ряд основных типов математических моделей с их краткой характеристикой.

Ключевые слова: повышенная шероховатость, камера сгорания, канал охлаждения, теплопередача, математическая модель.

Annotation: The paper describes the high roughness effect of the internal surfaces of the cooling channels in liquid rocket engine combustion chambers, which affects the heat exchange between the refrigerant and the channel wall, yet this effect can be positive or negative. The author lists some basic types of mathematical models for predicting the process and briefly characterizes them.

Key words: high roughness, combustion chamber, cooling channel, heat transfer, mathematical model.

Будущее аэрокосмической промышленности определяется разработкой и внедрением инновационных технологий [1, с. 1240], позволяющих ввести в эксплуатацию надёжный безопасный летательный аппарат с превосходными характеристиками. Изготовление деталей для аэрокосмической

промышленности является важным трудоёмким процессом [2, с. 498]. Создание компонентов, используемых в При разработке и испытаниях жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) одной из самых сложных и важных конструкторских и инженерных задач является проектирование эффективной и экономичной системы охлаждения стенок камер сгорания (тяговых камер) [3, с. 647], так как при относительно небольшом объёме камер в них происходит выделение колоссального количества энергии.

Среди различных методов охлаждения наиболее распространённым, ввиду того, что он эффективно минимизирует тепловые потоки стенок камеры сгорания, является регенеративное, при котором хладагентом выступает один из компонентов горючего, протекающий через стенки камеры сгорания по каналам охлаждения перед тем, как в неё поступить [4, с. 59; 5, с. 660].

В связи с этим стоит упомянуть о некоторых важных явлениях, влияющих на производительность и конструкцию ЖРД – поверхностном трении (силе сопротивления, возникающей в результате взаимодействия между стенкой тяговой камеры и потоком жидкости), и теплообмене (процессе обмена тепловой энергией между стенкой камеры и потоком жидкости).

Для проектирования и изготовления тяговых камер в современных ЖРД используются технологии аддитивного производства (АМ) [6, с. 59], обладающие рядом преимуществ перед традиционными технологиями в плане снижения затрат и сокращения времени на изготовление деталей. В качестве материалов для АМ широкое распространение получили порошки, смолы и термопластичные нити [7, с. 21]. Однако у АМ имеется существенный недостаток, заключающийся в следующем: одной из особенностей агрегата наддува ракетного двигателя, изготовленного по данной технологии, является повышенная шероховатость внутренних поверхностей каналов охлаждения, влияющая на коэффициент теплоотдачи [8, с. 109; 9, с. 37]. При традиционных способах изготовления шероховатость минимизируется [9, с. 37].

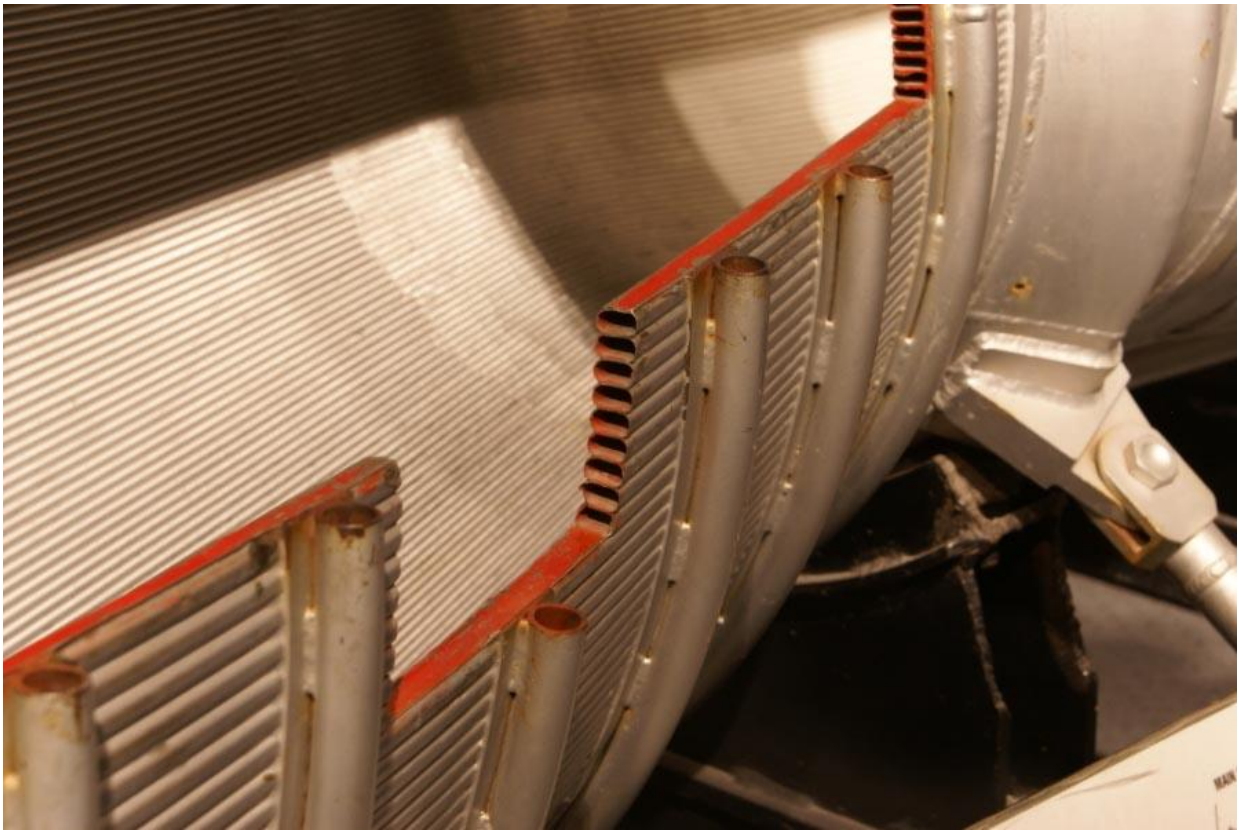


Рисунок 1 – Часть ЖРД в разрезе [10]

Шероховатость поверхности влияет на теплообмен между хладагентом и стенкой канала, причём эффект может быть как положительным, так и отрицательным. С одной стороны, она увеличивает термическое сопротивление стенки, что затрудняет передачу тепла, а с другой стороны, способствует возникновению и усилению интенсивности турбулентности потока, что улучшает перемешивание жидкости или газа и увеличивает коэффициент теплоотдачи [8, с. 109]. Преобладание того или иного эффекта зависит от ряда факторов, включая скорость и режим течения хладагента, размеры и форму неровностей, свойства материала, из которого изготовлена стенка канала.

При высокой шероховатости взаимосвязь между поверхностным трением и теплопередачей нелинейна, что представляет ряд сложностей для инженеров-конструкторов, следовательно, обычные математические модели для описания физических явлений в потоке, используемые для прогнозирования теплопередачи при низкой шероховатости, при их

применении к каналам с высокой шероховатостью, могут быть ошибочными.

Тем не менее существуют различные типы математических моделей, такие как аналитические, эмпирические, полуэмпирические и численные, которые учитывают некоторые нюансы, однако имеют свои преимущества и ограничения. Перечислим основные:

1) аналитические модели, основанные на строгих математических уравнениях, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии в потоке. Они дают точные решения для простых и идеализированных случаев, но часто бывают неприменимы или сложны для решения для реальных и сложных случаев.

2) эмпирические модели, которые основаны на экспериментальных данных и корреляциях, полученных из наблюдений за поведением потока в различных условиях. Такой тип моделей рассчитывает приближенные решения для конкретных случаев, но часто бывает ограничен областью применения и не учитывает физическую сущность явлений.

3) полуэмпирические модели, сочетающие в себе элементы аналитических и эмпирических моделей, используя как математические уравнения, так и экспериментальные данные. Полуэмпирические модели дают достаточно точные решения для широкого класса случаев, но требуют подбора эмпирических коэффициентов и констант.

4) численные модели, которые используют численные методы для решения математических уравнений, описывающих физические явления в потоке. Они позволяют найти приближенные решения для любых случаев, но требуют больших вычислительных ресурсов и выбора подходящих сеток, схем и граничных условий.

Вышеизложенное подтверждает тот факт, что изделия, изготовленные при помощи АМ, должны подвергаться дополнительной обработке (фрезерованию, сверлению, нанесению покрытия) с последующей стандартизацией качества [6, с. 59], так как надёжность и эффективность

работы космического аппарата могут быть достигнуты только за счёт правильной работы всех его компонентов [11, с. 492].

Использованные источники:

1. Бруев В.Н. Аэрокосмическая промышленность: обеспечение техносферной безопасности // Аллея науки. – 2023. – № 6 (81). – С. 1240.
2. Макаров Я.Ю. Станки с ЧПУ: надёжность и безопасность в аэрокосмической промышленности // Аллея науки. – 2023. – № 7 (82). – С. 498.
3. Ефимов М.В., Палачёв П.М. Перспективы применения однокомпонентных хладагентов в ракетостроении // Аллея науки. – 2022. – Т. 1. – № 12 (75). – С. 647.
4. Барышев С.А., Козловский Л.Н. Вопросы охлаждения ракетного двигателя // XXXI МНПК «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 20 февраля 2023. – С. 58.
5. Бруев В.Н. Системы охлаждения и теплопередачи жидкостных ракетных двигателей // Аллея науки. – 2022. – Т. 1. – № 12 (75). – С. 660.
6. Сергеев Н.А. Обзор материалов для аддитивного производства деталей ракетных двигателей // XXIII МНПК «Научные исследования молодых учёных». – Пенза, 12 мая 2023. – С. 59.
7. Макаров Я.Ю. Метод FDM: нюансы применения 3D-печати // XXIV МНПК «Научные исследования молодых учёных». – Пенза, 20 августа 2023. – С. 21.
8. 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.
9. Балыкин С.А., Росляков Е.Ю. Перспективен ли метод DED для ракетного

двигателестроения? // XXIV МНПК «Научные исследования молодых учёных». – Пенза, 20 августа 2023. – С. 37.

10. Иллюстрация: часть ЖРД в разрезе. – URL: https://hsto.org/getpro/geektimes/post_images/2a7/4a8/8e6/2a74a88e6be421228d4ffe6346f4777.jpg

11. Ефремов Н.В. Методы предотвращения эрозии сопла в жидкостных ракетных двигателях // Аллея науки. – 2023. – № 7 (82). – С. 492.