

Бруев В.Н.,

оператор станков с программным управлением 5 разряда токарного

участка (115-1) механического цеха (115)

АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

Россия, г. Химки

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

***Аннотация:** высокоэффективные жидкостные ракетные двигатели требуют охлаждения для поддержания структурной целостности камеры сгорания, которая подвергается высоким тепловым и экологическим нагрузкам, что достигается за счёт регенеративного охлаждения и жидкостно-плёночного охлаждения. В первом случае хладагент течёт по каналам вокруг стенки камеры сгорания, тем самым охлаждая её, во втором дополнительно образуется плёнка охлаждающей жидкости, которая создаёт теплоизоляционный эффект и снижает температуру стенок камеры. Для улучшения теплопередачи рассматривается наножидкость, обладающая уникальными свойствами теплопроводности. Внедрение описанных автором методов в ракетостроение открывает новые возможности для проектирования двигателей, что может привести к созданию более конкурентоспособных конструкций как с технической, так и с экономической точки зрения.*

***Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, регенеративное охлаждение, жидкостно-плёночное охлаждение, наножидкость, теплопроводность.*

***Annotation:** high-performance liquid rocket engines require cooling to maintain the structural integrity of the combustion chamber subjected to high*

thermal and environmental stresses, which is achieved by regenerative and liquid-film cooling. In the first case, the refrigerant flows through the channels around the combustion chamber wall, thereby cooling it, while in the second case, a film of coolant is additionally formed, which creates a thermal insulating effect and reduces the temperature of the chamber walls. Nanofluid, which has unique thermal conductivity properties, is considered to improve heat transfer. If implemented in rocket engineering, the methods described by the authors open up new opportunities for engine design, which can lead to the creation of more competitive designs both from a technical and economic point of view.

Key words: *liquid rocket engine, regenerative cooling, liquid-film cooling, nanofluid, thermal conductivity.*

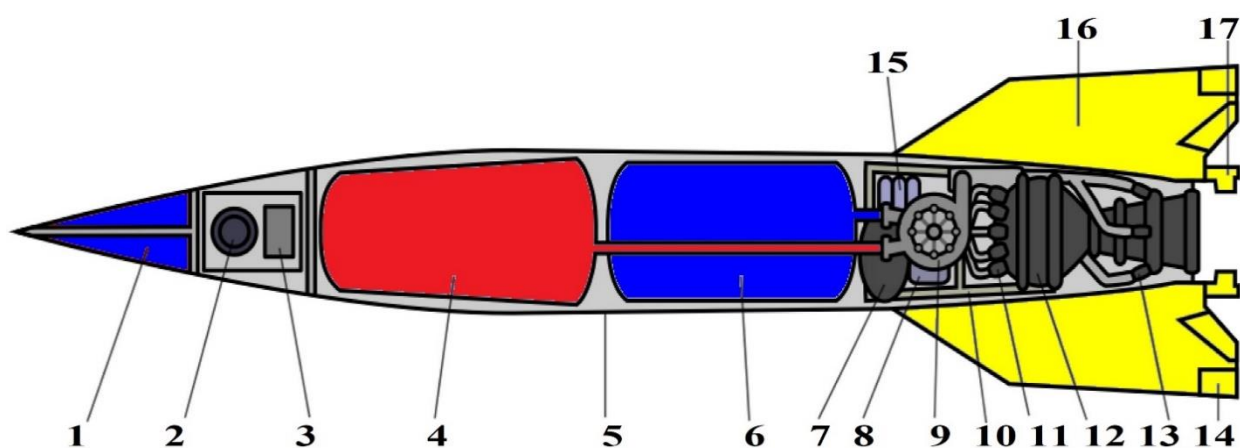
Одна из наиболее увлекательных и актуальных тем исследований в области ракетостроения – разработка эффективной и экономичной системы охлаждения при проектировании жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Ракетный двигатель представляет собой типичную систему передачи энергии, в которой химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию, сопровождаемую высоким давлением, а образующиеся газы проходят через сопло, где внутренняя энергия преобразуется в кинетическую, которая и создаёт движущую силу (тягу) [1, с. 2]. Тепло в камере сгорания и в сопле в этот момент достигает пиковой отметки. Следовательно, для сохранения стенок камеры сгорания и сопла необходима эффективная технология охлаждения критического сечения, имеющая решающее значение для повышения надёжности и долговечности конструкции [2, с. 2]. Помимо прочего, согласно тенденции к повторному использованию, система охлаждения должна защищать стенку камеры от термического износа за счёт использования меньшего количества охлаждающей жидкости [3, с. 460].

Для оценки производительности различных тепловых систем, к которым относятся ракетные двигатели, в коммерческих, механических, биологических

и технических инновационных методах используется значение энтропии. Объём энтропии в любом изолированном теплообменнике прямо пропорционален количеству вероятных состояний; чем выше число вероятных состояний, тем сильнее механизм необратимости, способствующий дезорганизации замкнутой системы.

Из-за большой теплоотдачи в ракетных установках крайне важно построить эффективный структурный аппарат, который имеет превосходные характеристики теплопередачи и снижает энтропию для получения наибольшего количества энергии.

Существует два механизма подачи топлива: разогретое топливо вовлекается непосредственно в процесс горения, либо подаётся в специальный газогенератор. Для наглядности рассмотрим рисунок 1.



- (1) боеголовка, (2) гироскоп с автоматическим управлением,
(3) радиокомандные и направляющие приёмники, (4) водно-спиртовая смесь,
(5) корпус ракеты, (6) жидкий кислород, (7) резервуар с перекисью водорода,
(8) реакционная камера для перекиси водорода, (9) топливный турбонасос,
(10) упорная рама, (11) крышки для кислородных / спиртовых горелок,
(12) камера сгорания, (13) впускной клапан для спирта, (14) флюгер,
(15) баллоны со сжатым азотом под давлением, (16) крыло,
(17) реактивная лопасть

Рисунок 1. Строение ракетного носителя [4, с. 3060],

прим.: перевод с англ. автора

Тепло, выделяемое при сгорании ракетного топлива, удерживается внутри отводимых газов. Несмотря на то, что газ-теплоноситель выбрасывается, тепло передаётся в камеру сгорания. Наиболее важными распространёнными методами охлаждения деталей двигателя являются регенеративное и жидкостно-плёночное охлаждение.

Метод регенеративного охлаждения – довольно популярный подход к охлаждению, используемый в жидкостных ракетных установках большой тяги, поскольку он эффективно минимизирует тепловые потоки стенок сопла и камеры сгорания. Данный метод предполагает протекание части или всего количества жидкого топлива через стенки сопла и камеры сгорания перед тем, как поступить в камеру сгорания. Для этой цели в стенках сопла и камеры предусматриваются каналы, по которым пропускают топливо с целью отвода тепла, что достаточно разумно ввиду способности топлива (в редких случаях и окислителя), быть хорошим хладагентом.

Исследование эффективности регенеративного охлаждения стало темой множества научных работ. Так, учёными были изучены следующие параметры: характеристики горячего газа, излучение газа, геометрические аспекты системы охлаждения, рёберный эффект, изменение характеристик материала и охлаждающей жидкости, потери теплового потока, и прочие.

Жидкостно-плёночное охлаждение широко используется в камерах сгорания газогенераторных, детандерных, двухступенчатых двигателей для управления теплопередачей между горячими реагирующими газами и более холодными структурными компонентами из-за его высокой эффективности охлаждения. Процесс охлаждения осуществляется за счёт помещения слоя охлаждающей жидкости между защищаемой поверхностью и высокотемпературным потоком. При этом жидкость вводится в камеру сгорания через отверстия и распределяется вдоль стенок. Плёнка охлаждающей жидкости создаёт теплоизоляционный эффект и снижает температуру стенок камеры. При жидкостно-плёночном охлаждении

испаряющийся плёночный хладагент не диффундирует быстро в основной газовый поток, а сохраняется в виде защитного слоя пара, прилегающего к стенке, образуя защитную плёнку, препятствующую переносу продуктов сгорания к стенкам, снижая скорость их окисления [5, с. 32].

Исследования жидкостно-плёночного охлаждения касаются различных аспектов, включая влияние величины отношения массы к потоку, угла впрыска, формы отверстий, длины струйного канала по отношению к его диаметру, расположение струйных решёток, расстояния между отверстиями струи вдоль или поперёк, отношения плотности, интенсивности турбулентности струи и поперечного потока, эффекта сжатия, и прочих.

Повышение эффективности работы тепловых устройств, в том числе и ЖРД, находящихся в центре внимания инженеров-конструкторов, помимо феномена охлаждения, напрямую зависит от исследования теплопередачи. Увеличение скорости теплопередачи в различных областях промышленности, включая электротехническую, авиационную и автомобильную, является одной из важнейших задач с точки зрения энергосбережения. Так, ограниченная теплопередача воды и моторного масла является серьёзным препятствием для повышения качества и эффективности работы тепловых устройств. Твёрдые материалы обладают лучшей теплопередачей, чем жидкости. К примеру, теплоёмкость меди в 700 раз превышает теплоёмкость воды, и в 3000 раз – моторного масла.

Ряд учёных выдвинул гипотезу о том, что использование твёрдых частиц размером от 0,1 до 100 нм в базовой жидкости может увеличить теплопроводность конвекционной жидкости, и, как следствие, улучшить теплопередачу. Такую жидкость с растворёнными в ней твёрдыми частицами назвали «наножидкость» (нанодисперсия, наноэмульсия) – единственная «твёрдая» жидкость, которая в настоящее время широко используется в системах отопления и в солнечной энергетике.

По мере увеличения кривизны объекта увеличивается теплопередача и скорость жидкости. В потоке жидкости распределение давления представляет собой тонкий слой движущегося вещества, который соприкасается с листом, к примеру, с поверхностью трубы. Данные потоки относятся к турбулентным. Согласно исследованиям, подобное свойство потока пограничного слоя возможно успешно использовать в производственных целях. Также имеется ряд исследований, в которых свойство теплопередачи используется для изучения характеристик двумерного потока намагниченных гибридных наножидкостей [4, с. 3062]. Однако из-за ограниченного количества литературы, касающейся более детального изучения теплопроводных свойств наножидкостей, заключим, что требуется провести исследования, которые позволят инженерам управлять компонентами системы, чтобы минимизировать энтропию и способствовать передаче тепла.

Использованные источники:

1. Сарычев С.С. Перспективы проектирования корпусных конструкций ракетных двигателей // Аллея науки. – 2022. – № 2 (65). – С. 2.
2. Сарычев С.С. Сопла ракет: краткий обзор // Аллея науки. – 2022. – № 2 (65). – С. 2.
3. Yang W., Sun B. Numerical simulation of liquid film and regenerative cooling in a liquid rocket // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 460.
4. Farooq U., Waqas H., Imran M., Alghamdi M., Muhammad T. On melting heat transport and nanofluid in a nozzle of liquid rocket engine with entropy generation // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Т. 14. – С. 3060-3062.
5. Сарычев С.С. Плёночное охлаждение жидкостных ракетных двигателей // VI МНПК «Наука и Просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 25 февраля 2022. – С. 32.