

## Новый подход к охлаждению ракетного кислородно-керосинового двигателя

# 06, июнь 2012

DOI: 10.7463/0612.0431608

Пелевин Ф. В., Авраамов Н. И., Семенов П. Ю.

УДК 536.24; 629.7.

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[Zaytseva@power.bmstu.ru](mailto:Zaytseva@power.bmstu.ru)

### Введение

В связи с переносом части космических пусков с космодрома «Байконур» на более северный космодром «Плесецк» [1] и введением в эксплуатацию новых ракетносителей «Союз-2.1В», «Ангара» [1, 2] возникает острая потребность в увеличении тяги кислородно-керосиновых двигателей, особенно двигателей больших тяг (первых ступеней ракетносителя) [2]. Такие же задачи стоят и перед американскими и китайскими учеными и инженерами [3–6].

В связи с этим возрастает актуальность повышения эффективности кислородно-керосиновых жидкостных двигателей. Существует множество предложений по модернизации кислородно-керосиновых двигателей:

- повышение давления в камере сгорания двигателя;
- интенсификация теплообмена в тракте охлаждения двигателя;
- добавка в топливо гелия [7];
- применение гелия в качестве охлаждающего (третьего) компонента [8];
- захлаживание керосина;
- охлаждение камеры двигателя жидким кислородом и др.

С ростом давления в камере сгорания и повышением коэффициента массового соотношения окислителя и горючего  $k_m$  растет не только удельный импульс двигателя, но и удельный тепловой поток  $q$  в стенку камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Поэтому создание новых высокоэкономичных двигателей во многом зависит от эффективности системы регенеративного охлаждения камеры двигателя.

В настоящее время в подавляющем большинстве эксплуатирующихся камер ЖРД используется оребренный тракт охлаждения, который обеспечивает интенсификацию теплообмена по сравнению с гладким каналом  $Nu/Nu_0$  в 1,5–3 раза [9]. Причем эффективность оребренного тракта уменьшается с ростом числа Рейнольдса  $Re$ . Применение искусственной шероховатости (преграды различной формы) [10] в трактах охлаждения ЖРД также не дает высокого эффекта. Степень интенсификации теплообмена  $Nu/Nu_0$  для преград различной формы достигает 1,3–1,7 раз, но и повышается относительная величина коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi/\xi_0$  различных преград при вариации числа Рейнольдса  $Re$  от 20 до 100 раз. Поэтому теплогидравлическая эффективность трактов с искусственной шероховатостью  $E=Nu/Nu_0/(\xi/\xi_0)^{1/3}$  составляет 0,25–1,1 раза. Причем наибольшее значение теплогидравлической эффективности  $E$  достигается в области низких значений чисел Рейнольдса  $Re \approx 10^4$ , что для ЖРД с оребренными трактами нехарактерно. Такой уровень интенсификации теплообмена зачастую не обеспечивает удовлетворительного температурного состояния конструкции, так как в последнее время наблюдается тенденция увеличения давления в камере сгорания. Поэтому для уменьшения удельных тепловых потоков  $q$  в стенку двигателя практически всегда используется внутреннее (завесное) охлаждение, что приводит к потере удельного импульса и усложнению конструкции двигателя.

Возникает необходимость перехода к новым конструкциям и технологиям изготовления теплообменных трактов, обеспечивающих надежное высокоэкономичное охлаждение камеры ЖРД.

Цель работы – разработка нового тракта охлаждения ЖРД с использованием пористых сетчатых материалов.

Один из перспективных и эффективных методов интенсификации теплообмена заключается в использовании пористых металлов (ПМ) в теплообменных устройствах. Но хотя заполнение теплообменного тракта пористым высокотеплопроводным металлом с малым термическим сопротивлением между стенкой и пористым металлом максимально интенсифицирует теплообмен [9], наблюдается резкое увеличение гидравлического сопротивления, что сдерживает применение этого метода в системе регенеративного охлаждения ЖРД. Для уменьшения потерь давления приходится идти на уменьшение скорости движения теплоносителя в ПМ за счет увеличения проходного сечения тракта, что приводит к снижению интенсификации теплообмена и повышению массы и габаритов тракта.

Уменьшить потери давления в системе охлаждения, не изменяя габаритных размеров теплообменного тракта, можно, если перейти от общеизвестного продольно-канального к продольно-поперечному (межканальному) движению теплоносителя через ПМ, изготовленный методом диффузионной сварки в вакууме металлических тканых сеток. Будем называть этот способ движения теплоносителя – межканальная транспирация теплоносителя сквозь пористый металл (МКТТ).

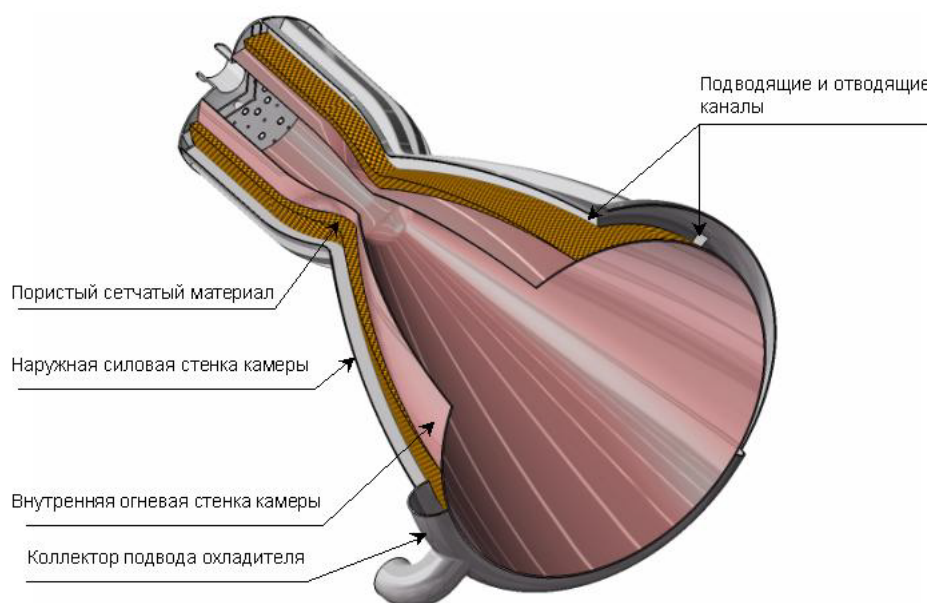
Научная новизна работы заключается в определении теплогидравлической эффективности пористого теплообменного тракта с МКТТ.

### Результаты исследований

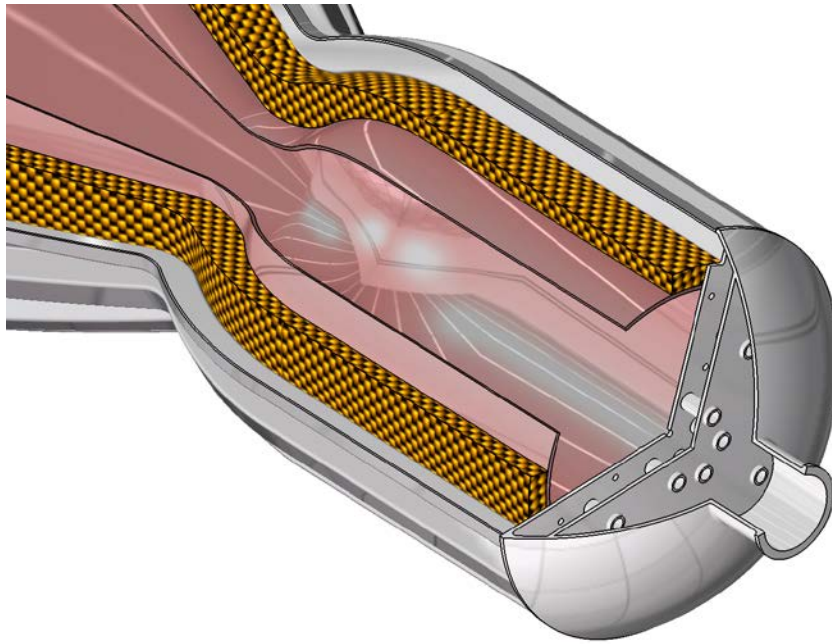
Принцип межканальной транспирации теплоносителя в сочетании с межсеточной фильтрацией теплоносителя [11] впервые позволяет создать высокоэффективный пористый теплообменный тракт с большей эффективностью теплообмена, чем у лучших оребренных трактов.

Тракт с межканальной транспирацией теплоносителя сочетает в себе высокую теплоотдачу [12], свойственную высокотеплопроводным ПМ, и низкие гидравлические потери [13]. Эти выводы хорошо согласуются с результатами работы [14], полученными для охлаждаемых пористых подложек зеркал лазеров.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы охлаждения камеры ЖРД с МКТТ.



а) разрез камеры с МКТТ

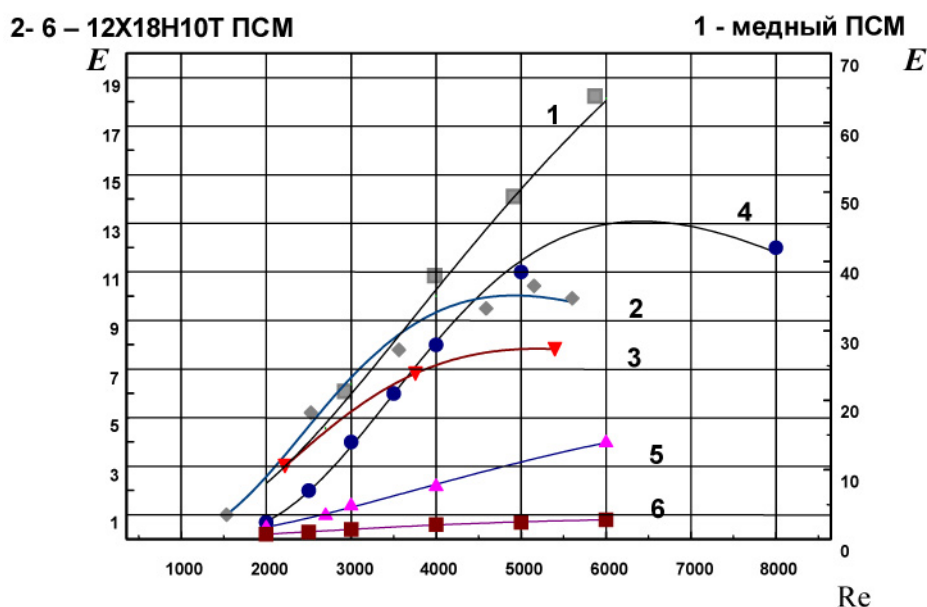


- б) смесительная головка, наружная силовая стенка камеры с выполненными в ней подводными и отводящими каналами, пористый сетчатый материал, внутренняя огневая стенка камеры

Рисунок 1 – Камера ЖРД с МКТТ

Из коллектора подвода охладителя (теплоносителя) теплоноситель поступает в подводные каналы, заполняет их и под действием перепада давления прокачивается в соседние два отводящих канала. Подводящие и отводящие каналы чередуются. Их число определяется заданным расходом охлаждающего компонента топлива и необходимой температурой огневой стенки камеры. Высокие коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  в тракте охлаждения достигаются высокоразвитой поверхностью теплообмена между пористым сетчатым материалом (ПСМ) и охлаждающим компонентом топлива при значительно более низких числах Рейнольдса, чем у оребренных трактов, что приводит к уменьшению гидравлических потерь по сравнению с оребренными трактами ЖРД [11].

На рисунке 2 показаны зависимости эффективности теплообмена в виде  $E = \left( \frac{St}{St_{ref}} \right)^3 \left( \frac{\xi_{ref}}{\xi} \right)$  от числа Рейнольдса  $Re$  для различных значений пористости (П) ПСМ тракта с МКТТ, коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  сеток (нержавеющей, медной сетки) и отношении длины пути теплоносителя  $l$  через ПСМ к толщине  $\delta$  пористой вставки  $l/\delta = 1,42...2,8$ .



1 – медный ПСМ ( $\Pi=0,61$ ); 2 – ПСМ из нержавеющей полотняной сетки П24 ( $l/\delta=1,56$ ;  $\Pi=0,345$ ); 3 – ПСМ из нержавеющей полотняной сетки П60 ( $l/\delta=1,42$ ;  $\Pi=0,368$ ); 4, 5, 6 – ПСМ из нержавеющей полотняной сетки П60 ( $l/\delta=2,4$ ;  $\Pi=0,48$ ; 0,37; 0,22 соответственно)

Рисунок 2 - Эффективность теплообмена  $E$  в пористом тракте с МКТТ

Эффективность пористого тракта с МКТТ возрастает с увеличением пористости ПСМ, коэффициента теплопроводности ПСМ, числа Рейнольдса, с уменьшением относительного пути движения теплоносителя. Как видно из рисунка 2, при пористости ПСМ  $\Pi=0,22$  (линия 6) тракт с МКТТ из тканой нержавеющей сетки полотняного переплетения П60 менее эффективен, чем гладкий канал. Но эффективность резко возрастает при увеличении пористости ПСМ (линии 4, 5, 6). Эффективность тракта на турбулентном режиме течения с пористостью ПСМ  $\Pi = 0,48$  из нержавеющей сетки полотняного переплетения П60 и отношением  $l/\delta = 2,8$  достигает одиннадцатикратного увеличения по сравнению с кольцевым трактом, не заполненным пористым металлом. Эффективность тракта с медным ПСМ достигает семидесятикратного увеличения.

На рисунке 3 представлены типичные значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  для тракта с МКТТ и оребренного тракта ЖРД от числа  $Re$  (теплоноситель – керосин) [11]. Установлено, что значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  для тракта с МКТТ значительно выше, чем у лучших оребренных трактов даже при меньших числах  $Re$  и, следовательно, при меньших гидравлических потерях.

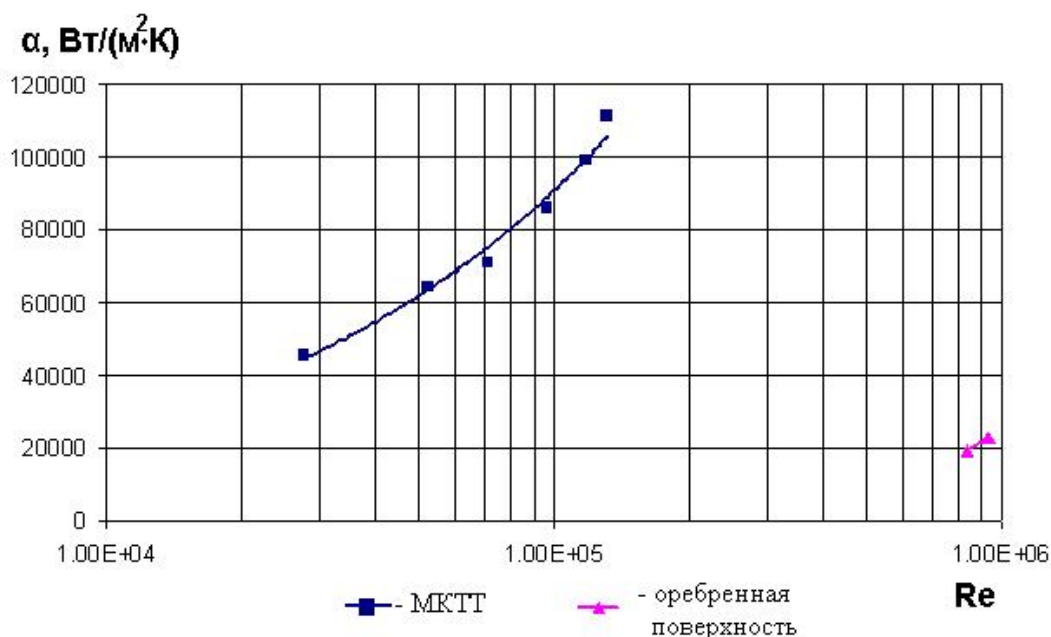


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от числа Рейнольдса  $Re$

Отличительной особенностью тракта с МКТТ является переменный расход охладителя по длине камеры ЖРД (в отличие от постоянного расхода в оребренном тракте охлаждения ЖРД по длине камеры). Это объясняется продольно-поперечном (межканальным) движением теплоносителя через ПСМ. Поэтому можно перераспределять охладитель по длине камеры в зависимости от уровня удельного теплового потока  $q$  по длине камеры  $x$  и добиваться равномерной допустимой температуры стенки камеры  $T_{st}$  в соответствии с рисунком 4.

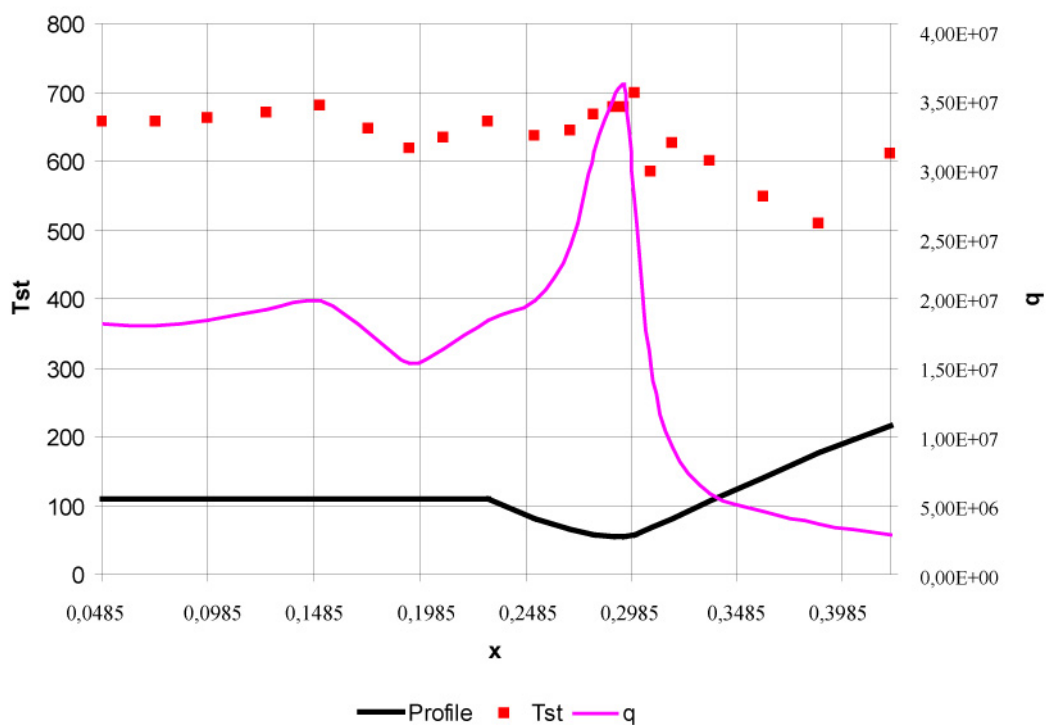


Рисунок 4 – Температура стенки камеры  $T_{st}$  по длине камеры  $x$  в зависимости от удельного теплового потока  $q$  [11]

На основании полученных экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению в пористых сетчатых материалах, данных по теплообмену в пористых трактах с МКТТ выполнен расчет однокамерного ЖРД большой тяги первой ступени ракеты-носителя на компонентах топлива жидкий кислород – керосин при давлении в камере  $p_k = 26$  МПа и тягой 2089 кН с межканальной транспирацией теплоносителя без внутреннего охлаждения камеры ЖРД.

Проектируемый двигатель предназначен для работы на «чистых компонентах». Он представляет собой ЖРД однократного включения с турбонасосной системой подачи топлива, выполненной по замкнутой схеме с дожиганием окислительного газогенераторного газа после турбины турбонасосного агрегата.

В качестве теплообменного тракта в цилиндрической части камеры сгорания (КС), в области критического сечения и небольшой части расширяющейся части сопла используется тракт с межканальной транспирацией теплоносителя сквозь пористый сетчатый материал. Регенеративная система охлаждения ЖРД с МКТТ имеет существенную особенность в том, что по всей длине тракта охлаждения керосин подается при начальной температуре и это существенно сказывается на температуре

стенки камеры по ее длине. В область с МКТТ поступает двойной расчетный расход керосина. После прохождения тракта с МКТТ он имеет температуру ниже температуры разложения керосина. После охлаждения камеры с МКТТ расчетная часть керосина поступает в смесительную головку. Другая часть керосина поступает для охлаждения сверхзвуковой части сопла, где применяется тракт с гофрированными вставками. Далее подогретый керосин поступает на турбину бустерного насоса горючего. В районе тракта с МКТТ огневая стенка выполнена из хромистой бронзы БрХ-08 с защитным термостойким покрытием – двуокись циркония, остальная часть сопла выполнена из стали 12Х18Н10Т.

Отличительная особенность камеры это то, что она работает на соотношении компонентов  $k_m$  равном 3,1, что значительно ближе к стехиометрическому соотношению компонентов. Удельный импульс при этом практически максимален для данной пары компонентов.

Другое отличие рассматриваемого двигателя это подогрев керосина, а не его охлаждение. Начальный подогрев керосина до 310 К уменьшает его вязкость, увеличивает теплоемкость и, как следствие, увеличивает теплоотдачу в тракте охлаждения при заданных гидравлических потерях в регенеративной системе охлаждения.

В ЖРД предполагается использовать теплообменный аппарат на основе МКТТ для подогрева керосина, поступающего в тракт с МКТТ, до расчетной температуры в 310 К.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в увеличении удельного импульса двигателя на 13...16 с.

### **Заключение**

По результатам проведенных исследований по повышению эффективности кислородно-керосиновых жидкостных двигателей можно сделать следующие выводы.

1) Применение системы МКТТ в области камеры сгорания и критического сечения и использование теплообменного аппарата на основе МКТТ позволяет повысить соотношение компонентов топлива, увеличить температуру керосина, что увеличивает ресурс и удельный импульс двигателя.

2) Применение в ЖРД соотношения компонентов топлива близкого к стехиометрическому соотношению компонентов приводит к достижению максимального удельного импульса и чистоты продуктов сгорания.

Все эти факторы в сумме позволяют отказаться от внутреннего охлаждения камеры, упрощают конструкцию камеры ЖРД, увеличивают



массу выводимой полезной нагрузки и сокращают вредные выбросы продуктов сгорания в окружающую среду.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маринин И. Стройка идет полным ходом. О стартовом комплексе для РН «Ангара» в Плесецке // Новости космонавтики. - 2011. - Т. 21, №10. - С. 47.
2. Афанасьев И. «Лунный» НК-33 движется к первому старту // Новости космонавтики. -2012. - Т. 22, № 10. – 62 с.
3. Черный И. Явление SLS народу // Новости космонавтики. - 2011. - Т.21, №11. - С. 50.
4. Черный И. Искристо-огненный сентябрь // Новости космонавтики. - 2011. - Т.21, №11. – 48 с.
5. Черный И. В Китае рассматривается сверхтяжелый носитель // Новости космонавтики. - 2011. - Т. 21, №10. – 49 с.
6. Черный И. Двигатели для новых китайских ракет // Новости космонавтики. - 2012. - Т.22, №3. – 53 с.
7. Возможности совершенствования характеристик ЖРД при использовании гелия в качестве топливной добавки. В.К. Чванов, В.И. Архангельский, И.А. Клепиков и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Специальный выпуск. - 2004. – С. 84-89.
8. Повышение энергетических характеристик и надежности кислородно-углеводородных маршевых ЖРД за счет использования новых систем охлаждения и подачи компонентов топлива. В.Д. Горохов, Р.Э Катков, В.П. Козелков и др. // Ракетно-космическая техника. Труды. Серия XII. Выпуск №1-2. «Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем». РКК «Энергия» им.С.П. Королева. - 2000. – С. 133-151.
9. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн 2./А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. Под ред. В.М. Кудрявцева. - М.: Высшая школа, 1993. – 368 с.
10. Богатко Т.В., Терехов В.И., Халатов А.А. Структура течения и теплообмен при турбулентном обтекании одиночных преград различной формы в трубе //Тепловые процессы в технике. - 2012. - Т.4., №4. - С. 146-155.
11. Конвективное охлаждение тепловых двигателей с использованием пористых материалов и принципа межканальной транспирации теплоносителя. Ф.В. Пелевин, Н.И. Авраамов, А.Л.Синцов, П.Ю. Семенов, А.В. Пономарев //Труды 16 школы-семинара под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в

энергетических установках». 21-25 мая 2007г., Санкт-Петербург. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - Т.1. - С. 479–481.

12. Пелевин Ф.В., Лозовецкий В.В. Конвективный теплообмен в пористых материалах при двумерном течении теплоносителя // ММФ-2008: VI Минский международный форум по тепло- и массообмену (19-23 мая 2008 г.): Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. Минск. - 2008. - Т.2. - С. 217–218.

13. Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление в пористых трактах с межканальной транспирацией теплоносителя // Труды 3-й Международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газодинамика дисперсных систем». Санкт-Петербург. - 2000. - С. 104-106.

14. Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал. М.: Изд-во МИФИ, 1993. – 152 с.

## New approach to cooling of rocket oxygen-kerosene engine

# 06, June 2012

DOI: 10.7463/0612.0431608

Pelevin F.V., Avraamov N.I., Semenov P.Yu.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

[Zaytseva@power.bmstu.ru](mailto:Zaytseva@power.bmstu.ru)

The authors analyzed modernization of oxygen-kerosene engines. It was shown that the traditional ribbed cooling channel couldn't increase efficiency of the first stage oxygen-kerosene engines. New methods of LPE cooling are considered.

---

Publications with keywords: [optimization](#), [liquid rocket engine](#), [cooling](#), [porous net material](#), [interchannel transpiration](#)

Publications with words: [optimization](#), [liquid rocket engine](#), [cooling](#), [porous net material](#), [interchannel transpiration](#)

---

### References

1. Marinin I. Stroika idet polnym khodom. O startovom komplekse dlia RN «Angara» v Plesetske [Construction is well underway. On the launch complex for launch vehicles, "Angara" at Plesetsk]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2011, vol. 21, no. 10, p. 47.
2. Afanas'ev I. «Lunnyi» NK-33 dvizhetsia k pervomu startu ["Moon" NK-33 moves to the first start]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2012, vol. 22, no. 10, p. 62.
3. Chernyi I. Iavlenie SLS narodu [The phenomenon of SLS to the people]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2011, vol. 21, no. 11, p. 50.
4. Chernyi I. Iskristo-ognennyi sentiabr' [Sparkling-fire-September]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2011, vol. 21, no. 11, p. 48.
5. Chernyi I. V Kitae rassmatrivaetsia sverkhiazhelyi nositel' [Super-heavy vehicle is regarded in China]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2011, vol. 21, no. 10, p. 49.
6. Chernyi I. Dvigateli dlia novykh kitaiskikh raket [Engines for the new Chinese missiles]. *Novosti kosmonavtiki* [News of Cosmonautics], 2012, vol. 22, no. 3, p. 53.
7. Chvanov V.K., Arkhangel'skii V.I., Klepikov I.A., Sternin L.E., Konovalov S.G., Khazov V.N. Vozmozhnosti sovershenstvovaniia kharakteristik ZhRD pri ispol'zovanii geliia v kachestve toplivnoi dobavki [Possibilities of improving the characteristics of liquid-propellant rocket engine using helium as a fuel additive]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana*.

*Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2004, Spec. iss., pp. 84-89.

8. Gorokhov V.D., Katkov R.E., Kozelkov V.P., et. al. Povyshenie energeticheskikh kharakteristik i nadezhnosti kislorodno-uglevodorodnykh marshevykh ZhRD za schet ispol'zovaniia novykh sistem okhlazhdeniia i podachi komponentov topliva [Improving energy performance and reliability of the oxygen-hydrocarbon sustainer liquid-propellant rocket engine through the use of new cooling systems and supply of components of fuel. *Raketno-kosmicheskaiia tekhnika: Trudy. Ser. XII. Vyp. №1-2 : Raschet, proektirovanie, konstruirovaniie i ispytaniia kosmicheskikh sistem* [Rocket and Space Technology: Proceedings. Ser. XII. Vol. № 1-2: Calculation, design, construction and testing of space systems]. The Korolev RKK "Energy" Publ., 2000, pp. 133-151.

9. Vasil'ev A.P., Kudriavtsev V.M., Kuznetsov V.A., et. al. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigatelei. V 2 kn. Kn 2.* [Fundamentals of theory and design of liquid propellant rocket engines. In 2 books. Book 2]. Moscow, Vysshaia shkola, 1993. 368 p.

10. Bogatko T.V., Terekhov V.I., Khalatov A.A. Struktura techeniia i teploobmen pri turbulentnom obtekanii odinochnykh pregrad razlichnoi formy v trube [The structure of the flow and heat exchange in turbulent flow over solitary barriers of different form in the pipe]. *Teplovyie protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2012, vol. 4, no. 4, pp. 146-155.

11. Pelevin F.V., Avraamov N.I., Sintsov A.L., Semenov P.Iu., Ponomarev A.V. Konvektivnoe okhlazhdenie teplovykh dvigatelei s ispol'zovaniem poristykh materialov i printsipa mezhkanal'noi transpiratsii teplonositel'ia [Convective cooling of the heat engine using porous materials and the principle of inter-channel transpiration of heat carrier]. *Trudy 16 shkoly-seminara pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leont'eva «Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh»* [Proceedings of the 16-th school-seminar under the leadership of RAS academician, A.I. Leontief «Problems of gas dynamics and heat transfer in power plants»], Sankt-Peterburg, 21-25 May 2007. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2007, vol. 1, pp. 479-481.

12. Pelevin F.V., Lozovetskii V.V. Konvektivnyi teploobmen v poristykh materialakh pri dvumernom techenii teplonositel'ia [Convective heat transfer in porous materials in two-dimensional flow of the heat-carrier]. *MMF-2008: VI Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo- i massoobmenu (19-23 maia 2008 g.): Tez. dokl. i soobshch.* [MMF-2008: VI Minsk international forum on heat and mass transfer: The theses of the reports and messages], The Lykov Institute of Heat - and Mass-exchange of NAS of Belarus, 19-23 May 2008. Minsk, 2008, vol. 2, pp. 217-218.

13. Pelevin F.V. Gidravlichesкое soprotivlenie v poristykh traktakh s mezhkanal'noi transpiratsiei teplonositel'ia [Hydraulic resistance in the porous paths with inter-channel transpiration of heat carrier]. *Trudy 3-i Mezhdunarodnoi shkoly-seminara «Vnutrikamernye protsessy, gorenii i gazodinamika dispersnykh sistem»* [Proc. of the 3rd International School-Seminar "Intrachamber processes, combustion and gas dynamics of disperse systems"]. Sankt-Peterburg, 2000, pp. 104-106.

14. Kharitonov V.V. *Teplofizika lazernykh zerkal* [Thermal physics of laser mirrors]. Moscow, MIFI Publ., 1993. 152 p.