

УДК 532.529+629

## О ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ – СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В АЭРОКОСМИЧЕСКОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

<sup>1</sup>Булат П.В., <sup>2</sup>Ильина Е.Е.

<sup>1</sup>ООО «НОЦ «Динамика», Санкт-Петербург, e-mail: pavelbulat@mail.ru;

<sup>2</sup>ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашины», Санкт-Петербург, e-mail: il-190.89@mail.ru

Рассмотрены основные тенденции совершенствования воздушно-реактивных и ракетных двигателей. Традиционные направления работ связаны с внедрением новых материалов, алгоритмов управления, совершенствованием аэродинамики проточной части двигателей, сокращением количества деталей и узлов, улучшением эксплуатационной технологичности. Однако только этих мер эволюционного развития уже недостаточно. К прорывным технологиям в области аэрокосмического двигателестроения можно отнести: применение бесконтактных подшипников и безмасляных трансмиссий, управляемых камер сгорания, газодинамических стабилизаторов горения, использование новых более эффективных термодинамических циклов работы тепловой машины. К последним относятся пульсирующие воздушно-реактивные и детонационные двигатели. В статье рассмотрены преимущества использования детонационного горения в турбореактивных и ракетных двигателях. Сформулирована главная проблема на пути практической реализации использования детонационных двигателей и предложен возможный путь ее решения.

**Ключевые слова:** детонационный двигатель, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, детонационное горение, цикл Хампфри

## THE PROBLEM OF CREATING DETONATION ENGINE – CURRENT TRENDS IN AEROSPACE ENGINE MANUFACTURING

<sup>1</sup>Bulat P.V., <sup>2</sup>Ilina E.E.

<sup>1</sup>SEC «Dynamics» ltd, St. Petersburg, e-mail: pavelbulat@mail.ru;

<sup>2</sup>Problem Laboratory «Turbomachine» ltd, St. Petersburg, e-mail: il-190.89@mail.ru

The main trend of improving air breathing and rocket engines. Traditional areas of work associated with the implementation of new materials, control algorithms, improving the aerodynamics of the engine running, a reduction of parts and assemblies, improved maintainability. However, only the evolution of these measures is not enough. To the breakthrough technologies in the field of aerospace engine include: the use of non-contact bearings and oil-free transmission, controlled combustion chambers, combustion gas dynamic stabilizers, the use of new, more efficient thermodynamic cycles of the heat engine. The latter include the pulse jet engines and detonation. The paper considers the advantages of detonation combustion turbine and rocket engines. Formulated the main problem in the practical use of the detonation engines and offered a possible way of solving it.

**Keywords:** detonation engine, pulsating jet engine, detonation combustion, cycle Humphrey

В настоящее время отрасль переживает этап выработки новых приоритетов развития. В статье [11] рассмотрены основные приоритеты, задачи, пути развития научных направлений, создания новых технологий в свете решения современных проблем двигателей летательных аппаратов, а также [1] рассмотрены основные зарубежные программы в области двигателестроения и проблемы, связанные с численным моделированием перспективных двигателей.

### Основные мировые тенденции в отрасли аэрокосмического машиностроения

Полный перечень направлений развития реактивных двигателей до 2035 г. дан в аналитическом обзоре ЦИАМ [8]. Можно выделить несколько основных тенденций, которые активно обсуждаются на страницах периодической печати [6, 12–14]:

- Решение задач материаловедения:
  - внедрение матричных композитов в конструкцию лопаточных машин,
  - разработка адиабатических неохлаждаемых камер сгорания с покрытием из карбида кремния,

- разработка новых сплавов с присадками рения и рутения,
- разработка износостойких покрытий для пар трения на основе карбидов и нитридов, а также технологий их нанесения на металлические поверхности или выращивания методом хлоргидридной эпитаксии.

- Улучшение эксплуатационной технологичности:

- безмасляные трансмиссии [5, 9-10],
- сокращение количества узлов и переход к модульной конструкции.

- Внедрение новых алгоритмов управления двигателем:

- переход к управляемым камерам сгорания, работающих на сверхбедных топливных смесях,

- управление двигателем по неизмеряемым параметрам,

- использование имитационных и стохастических алгоритмов управления.

- Улучшение термодинамики традиционных двигателей:

- внедрение промежуточного охлаждения компрессоров,

– замена механических стабилизаторов горения на газодинамические, использующие эффект течения с внезапным расширением, в том числе, на колебательных режимах работы [2-4];

– внедрение предварительного охлаждения воздуха (вплоть до его сжижения) в комбинированных турбо-ракетных двигателях;

– разработка двухконтурных двигателей с турбинами и форсажными камерами во внешнем контуре.

● Внедрение принципиально новых узлов:

– детонационные камеры сгорания, форсажные устройства и усилители тяги,

– высокооборотные компрессоры и турбины, основанные на иных, чем лопаточные машины, принципах работы.

● Разработка комбинированных двигателей, сочетающих в одной конструкции

машины, работающие в соответствии с разными термодинамическими схемами:

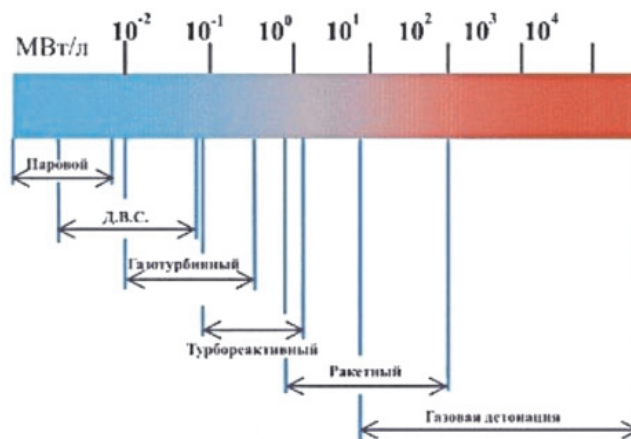
– совмещение газовой турбины и электродвигателя;

– совмещение ТРД и объемной машины, совмещение турбины и электрохимического генератора;

– совмещение реактора сверхкритического окисления, реактивной турбины и МГД-генератора;

– турбо-прямоточный двигатель, ракетно-прямоточный и турборакетный двигатели.

Одним из лучших в термодинамическом плане является детонационный двигатель. Благодаря тому, что в нем сжигание топлива происходит в ударных волнах примерно в 100 раз быстрее, чем при обычном медленном горении (дефлаграции), этот тип двигателя теоретически отличается рекордной мощностью, снимаемой с единицы объема, по сравнению со всеми другими типами тепловых двигателей (рисунок).



Сравнение литровой мощности современных двигателей

**Понятие детонационного двигателя**

Вопрос об использовании детонационного горения в энергетике и реактивных двигателях впервые поставлен Я.Б. Зельдовичем еще в 1940 г. [7]. По его оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность.

Различаются детонационные двигатели двух типов: воздушно-реактивные с потреблением атмосферного кислорода PDE (Pulse Detonation Engine) и ракетные PDRE (Pulse Detonation Rocket Engine). Альтернативой PDE и PDRE являются двигатели с непрерывной детонацией (CDE) и ротационные детонационные двигатели (RDE), работающие не в пульсирующем, а в непрерывном режиме.

Традиционные импульсные детонационные двигатели (ИДД) представляют собой длинные трубы, по которым с небольшой

частотой следуют ударные волны. Система волн сжатия и разрежения автоматически регулирует подачу топлива и окислителя. Из-за низкой частоты следования ударных волн (единицы Гц) время, в течение которого происходит сжигание топлива, по сравнению с характерным временем цикла, мало. В результате, несмотря на высокий КПД собственно детонационного сжигания (на 20–25% больше, чем у двигателей с циклом Брайтона), общий КПД таких конструкций низкий.

Основная задача в этой области на современном этапе – разработка двигателей с высокой частотой следования ударных волн в камере сгорания или создание двигателя с непрерывной детонацией (CDE).

**Детонационное горение и ракетный двигатель**

Основными преимуществами импульсных ракетных детонационных двигателей считаются:

- Высокие экономические показатели.
- Удельный импульс ракетных двигателей на 5–10% выше, чем у криогенных ЖРД.
- Расход топлива у импульсных двигателей с потреблением атмосферного кислорода на 30–50% меньше, чем у ВРД.
- Простота конструкции и соответственно высокая надежность.
- Компоненты топлива подаются в камеру сгорания при низком давлении, что позволяет отказаться от использования турбонасосных агрегатов (ТНА) и усиленных трубопроводов (некоторого упрочнения потребует лишь камера сгорания, поскольку при микровзрыве давление в ней увеличивается в 18–20 раз).
- Низкие затраты на производство, по удельной стоимости единицы тяги импульсные двигатели примерно в четыре раза дешевле обычных ТРД (55 долл. за 1 кг тяги против 220 долл./кг).

В качестве примера можно для оценки преимуществ ИДД использовать параметры маршевых ЖРД «Спейс Шаттла». Давление за ТНА жидкого водорода – около 500 атм. Давление в камере сгорания – 210 атм. Чтобы обеспечить аналогичные условия сжигания топлива в ИДД, компоненты нужно подавать под давлением не более 10 атм.

Таким образом, основным преимуществом использования детонационного горения в ЖРД нужно признать не потенциальное увеличение КПД и удельного импульса, а радикальное снижение стоимости двигателя.

#### Заключение

Потенциальные преимущества детонационных двигателей, основанные на высокой скорости сгорания топлива, сулят большие преимущества, связанные с повышением термодинамического цикла и упрощением (удешевлением) конструкции. Трудности практической реализации определяются доминирующими конструктивными схемами, использующими пульсирующую схему работы, следствием чего является малая энергетическая эффективность работы в среднем по времени, хотя КПД собственно сгорания велик. Выход видится в увеличении частоты следования детонационных волн и переходе к схемам с непрерывной детонацией.

#### Список литературы

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Особенности применения моделей турбулентности при расчете течений в сверхзвуковых трактах перспективных воздушно-реактивных двигателей // Двигатель. – 2012. – № 1. – С. 20–23.
2. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О классификации режимов течения в канале с внезапным расширением // Теплофизика и Аэромеханика. – 2012. – № 2. – С. 209–222.
3. Булат П.В., Продан Н.В., Усков В.Н. О низкочастотных расходных колебаниях донного давления. – 2013. – № 4(3). – С. 545–549.
4. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В., Колебания донного давления // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – С. 204–207.
5. Булат П.В., Усков В.Н., Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в со-

плах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // Вестник МАХ. – 2013. – № 1. – С. 57–60.

6. Военное обозрение. – Вып. 19 ноября 2012.
7. Зельдович Я.Б., ЖЭТФ 10, 542 (1940).
8. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей: аналитический обзор. ЦИАМ им. Баранова. – М., 2004. – 211 с.
9. Смирнова О.С., Булат П.В., Продан Н.В. Применение управляемых газо- и гидростатических подшипников в турбонасосных агрегатах многофазовых комбинированных // Фундаментальные исследования. – № 4(2). – 2013. – С. 335–339.
10. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник МАХ. – 2012. – № 3. – С. 3–7.
11. Фалалеев С.В. Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов. Самарский государственный аэрокосмический университет: электронное учебное пособие. – Самара, 2012. – 106 с.
12. Aviation Week and Space Technology. – 2000. – 17/ VII, vol. 153, № 3. – P. 70–71.
13. Aviation Week and Space Technology. – 1999. – 5/ IV, vol 150, № 14. – P. 57, 58.
14. Flight International. – 2000. – 7-13/XI, vol. 158, № 4754. – P. 43.

#### References

1. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V., Osobennosti primeneniya modelej turbulentsnosti pri raschete techenij v sverhzvukovykh traktah perspektivnykh vozdušno-reaktivnykh dvigatelej. Dvigatel'. no. 1, 2012. pp. 20–23.
2. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Uskov V.N. O klassifikacii rezhimov techenija v kanale s vnezapnym rasshireniem. Teplofizika i Aeromehanika. no. 2. 2012. pp. 209–222.
3. Bulat P.V., Prodan N.V. O Nizkochastotnykh rashodnykh kolebanijah donnogo davlenija, no. 4(3). 2013. pp. 545–549.
4. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Kolebanija donnogo davlenija. Fundamental'nye issledovanija, no. 3, 2012, pp. 204–207.
5. Bulat P.V., Uskov V.N., Ob issledovanii kolebatel'nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turboholodil'nyh i detandernykh mashin. Chast' I. Postanovka zadachi. VESTNIK MAH. 2013. no. 1, pp. 57–60.
6. Zhurnal «Voennoe obozrenie». Vypusk 19 nojabrja 2012.
7. Zel'dovich Ja.B., ZhJeTF 10, 542 (1940).
8. Raboty vedushhih aviadvigatelistroitel'nyh kompanij po sozdaniju perspektivnykh aviacionnykh dvigatelej (analiticheskij obzor). CIAM im.Baranova, M., 2004, 211 p.
9. Smirnova O.S., Bulat P.V., Prodan N.V., Primenenie upravljajemykh gazo- i gidrostatičeskikh podshipnikov v turbonasosnykh agregatah mnogorazovykh kombinirovannykh, Fundamental'nye issledovanija. no. 4(2). 2013. pp. 335–339.
10. Uskov V.N., Bulat P.V. Ob issledovanii kolebatel'nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turboholodil'nyh i detandernykh mashin. Chast' I. Postanovka zadachi. VESTNIK MAH, no. 3, 2012, pp. 3–7.
11. Falaleev S.V., Sovremennye problemy sozdanija dvigatelej letatel'nykh apparatov. Samarskij gosudarstvennyj ajerokosmicheskij universitet. Jelektronnoe uchebnoe posobie. Samara, 2012. 106 p.
12. Aviation Week and Space Technology, 2000, 17/VII, vol. 153, no. 3, pp. 70–71.
13. Aviation Week and Space Technology, 1999, 5/ IV, vol 150, no. 14, pp. 57, 58.
14. Flight International, 2000, 7-13/XI, vol. 158, no. 4754, pp. 43.

#### Рецензенты:

Пеленко В.В., д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе Института холода и биотехнологий ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург;

Цветков О.Б., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы тепло- и хладотехники» Института холода и биотехнологий ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 29.10.2013.