

ОБЗОР ПРОЕКТОВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. РОТАЦИОННЫЕ ДЕТОНАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

¹Булат П.В., ²Продан Н.В.

¹ООО НОЦ «Динамика»;

²ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашинь», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru

Рассмотрена проблема разработки ротационных детонационных двигателей. Представлены основные типы таких двигателей: ротационный детонационный двигатель Николса, двигатель Войцеховского. Рассмотрены основные направления и тенденции развития конструкции детонационных двигателей. Показано, что современные концепции ротационного детонационного двигателя не могут в принципе привести к созданию работоспособной конструкции, превосходящей по своим характеристикам существующие воздушно-реактивные двигатели. Причиной является стремление конструкторов объединить в один механизм генерацию волны, горение топлива и эжекцию топлива и окислителя. В результате самоорганизации ударно-волновых структур детонационное горение осуществляется в минимальном, а не максимальном объеме. Реально достигнутый сегодня результат – детонационное горение в объеме, не превышающем 15% объема камеры сгорания. Выход видится в ином подходе – сначала создается оптимальная конфигурация ударных волн, а уже затем в эту систему подаются компоненты топлива и организуется оптимальное детонационное горение в большом объеме.

Ключевые слова: детонационный двигатель, ротационный детонационный двигатель, двигатель Войцеховского, круговая детонация, спиновая детонация, импульсный детонационный двигатель

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF PROJECTS DETONATION ENGINES. ROTATING DETONATION ENGINES

¹Bulat P.V., ²Prodan N.V.

¹SEC «Dynamics» ltd;

²Problem Laboratory «Turbomachine» ltd, St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru

The problem of the development of rotary detonation engines. The main types of engines: a rotary engine detonation Nichols, engine Wojciechowski. The main directions and trends in the design of detonation engines. It is shown that the modern concept of the rotary detonation engine can not, in principle, lead to the creation of a workable design, superior in performance of existing jet engines. The reason is the desire of designers to combine into a single mechanism for the generation of waves, burning fuel and ejecting the fuel and oxidizer. As a result of self-organization of shock-wave structures detonation combustion is carried out in the minimum and not the maximum extent. Actually achieved the result today – detonation combustion in an amount not exceeding 15% of the volume of the combustion chamber. The output is seen in a different approach – first create the optimum configuration of shock waves, and only then are fed into the system components and fuel organized optimum detonation combustion in large volume.

Keywords: detonation engine, rotary engine detonation, engine Voitsekhovskii, circular detonation spin detonation, pulse detonation engine

Ротационные детонационные двигатели

Все виды ротационных детонационных двигателей (RDE) роднит то, что система подачи топлива объединена с системой сжигания топлива в детонационной волне, но дальше все работает, как в обычном реактивном двигателе – жаровая труба и сопло. Именно этот факт и инициировал такую активность на ниве модернизации газотурбинных двигателей (ГТД). Представляется привлекательным заменить в ГТД только смесительную головку и систему розжига смеси. Для этого нужно обеспечить непрерывность детонационного горения, например, запустив волну детонации по кругу. Одним из первых такую схему предложил Николс в 1957 г. [6], а затем развил ее и в середине 60-х годов провел серию экспериментов с вращающейся детонационной волной (рис. 1).

Регулируя диаметр камеры и толщину кольцевого зазора, для каждого вида топливной смеси можно подобрать такую геометрию, что детонация будет устойчивой. На практике соотношения величины зазора и диаметра двигателя получают неприемлемыми и регулировать скорость распространения волны приходится, управляя подачей топлива, о чем сказано ниже.

Так же как и в импульсных детонационных двигателях, круговая детонационная волна способна эжектировать окислитель, что позволяет использовать RDE при нулевых скоростях. Этот факт повлек за собой шквал экспериментальных и расчетных исследований RDE с кольцевой камерой сгорания и самопроизвольной эжекцией топливно-воздушной смеси, перечислять здесь которые не имеет никакого смысла. Все они построены примерно по одной схеме (рис. 2), напоминающей схему двигателя Николса (рис. 1).

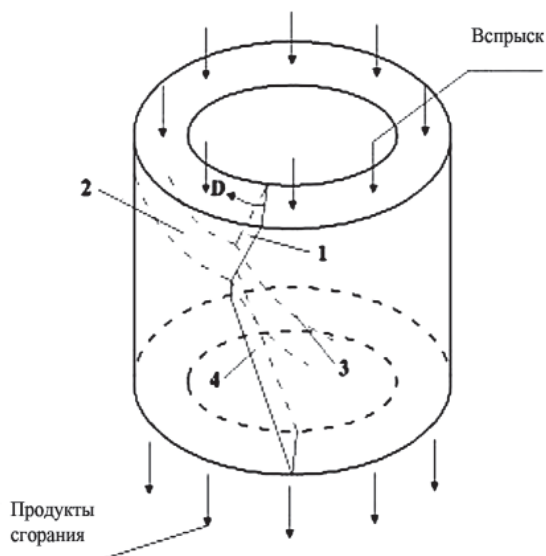


Рис. 1. Схема организации непрерывной круговой детонации в кольцевом зазоре: 1 – детонационная волна; 2 – слой «свежей» топливной смеси; 3 – контактный разрыв; 4 – распространяющийся вниз по течению косой скачок уплотнения; D – направление движения детонационной волны

но основная проблема в проектировании подобных RDE заключается в том, что повсеместно используемая упрощенная модель течения во фронте детонационного горения совершенно не соответствует реальности.

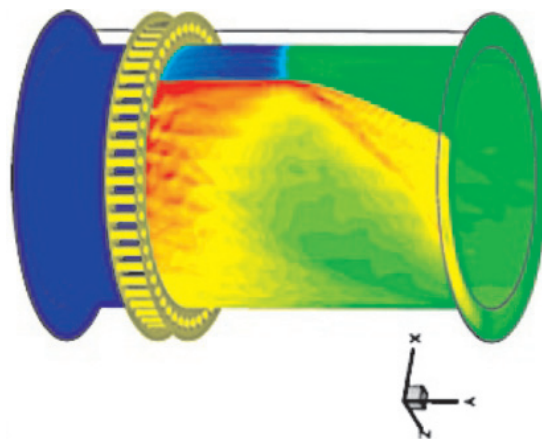


Рис. 3. RDE с регулируемой подачей топлива в область горения. Ротационный двигатель Войцеховского

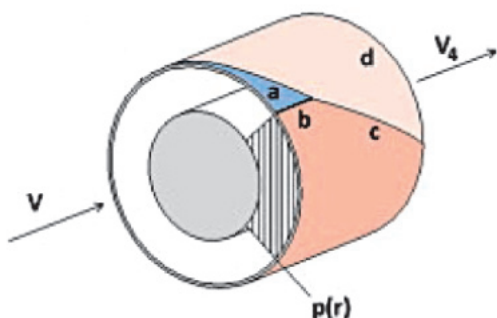


Рис. 2. Типичная схема RDE: V – скорость набегающего потока; V_4 – скорость потока на выходе из сопла; a – свежая ТВС, b – фронт детонационной волны; c – присоединенный косой скачок уплотнения; d – продукты сгорания; $p(r)$ – распределение давления на стенке канала

Основные надежды в мире связываются с детонационными двигателями, работающими по схеме ротационного двигателя Войцеховского. В 1963 г. Б.В. Войцеховский по аналогии со спиновой детонацией [5] разработал схему непрерывного сжигания газа за тройной конфигурацией ударных волн, циркулирующих в кольцевом канале [1] (рис. 4).

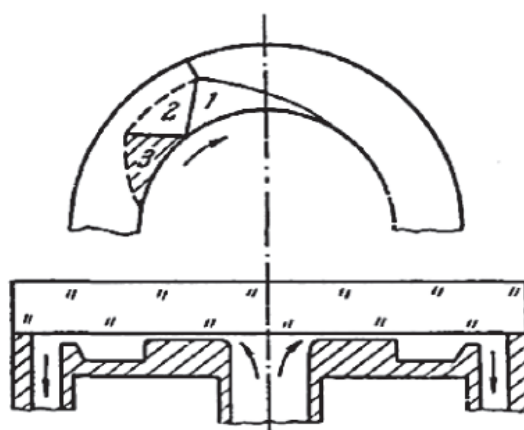


Рис. 4. Схема Войцеховского непрерывного сжигания газа за тройной конфигурацией ударных волн, циркулирующих в кольцевом канале: 1 – свежая смесь; 2 – дважды сжатая смесь за тройной конфигурацией ударных волн, область детонации

Разумной альтернативой схеме Николая могла бы стать установка множества топливно-окислительных форсунок, которые бы впрыскивали топливно-воздушную смесь в область непосредственно перед детонационной волной по определенному закону с заданным давлением (рис. 3). Регулируя давление и скорость подачи топлива в область горения за детонационной волной, можно влиять на скорость ее распространения вверх по потоку. Данное направление является перспективным,

В данном случае стационарный гидродинамический процесс с горением газа за ударной волной отличается от схемы детонации Чепмена–Жуге и Зельдовича–Неймана. Такой процесс вполне устойчив, его длительность определяется запасом топливной смеси и в известных экспериментах составляет несколько десятков секунд.

Схема детонационного двигателя Войцеховского послужила прототипом многочисленных исследований ротационных и спиновых детонационных двигателей, инициированных в последние 5 лет. На эту схему приходится более 85% всех исследований. Всем им присущ один органический недостаток – зона детонации занимает слишком маленькую часть общей зоны горения, обычно не более 15%. В результате удельные показатели двигателей получаются хуже, чем у двигателей традиционной конструкции.

О причинах неудач с реализацией схемы Войцеховского

Большинство работ по двигателям с непрерывной детонацией связано с развитием концепции Войцеховского. Несмотря на более чем 40-летнюю историю исследований, результаты фактически остались на уровне 1964 г. Доля детонационного горения не превышает 15% от объема камеры сгорания. Остальное – медленное горение в условиях, далеких от оптимальных.

Одной из причин такого положения дел является отсутствие работоспособной методики расчета. Поскольку течение является трехмерным, а при расчете учитываются только законы сохранения количества движения на ударной волне в перпендикулярном к модельному фронту детонации направлении, то результаты расчета наклона ударных волн к потоку продуктов сгорания отличаются от экспериментально наблюдаемых более чем на 30%. Следствием является то, что, несмотря на многолетние исследования различных систем подачи топлива и эксперименты по изменению соотношения компонентов топлива, все, что удалось сделать, – это создать модели, в которых детонационное горение возникает и поддерживается в течение 10–15 с. Ни об увеличении КПД, ни о преимуществах по сравнению с существующими ЖРД и ГТД речи не идет.

Проведенный авторами проекта анализ имеющихся схем RDE показал, что все предлагающиеся сегодня схемы RDE неработоспособны в принципе. Детонационное горение возникает и успешно поддержи-

вается, но только в ограниченном объеме. В остальном объеме мы имеем дело с обычным медленным горением, причем за неоптимальной системой ударных волн, что приводит к значительным потерям полного давления. Кроме того, давление оказывается также ниже в разы, чем необходимо для идеальных условий горения при стехиометрическом соотношении компонентов топливной смеси. В результате удельный расход топлива на единицу тяги оказывается на 30–40% выше, чем у двигателей традиционных схем.

Но самой главной проблемой является сам принцип организации непрерывной детонации. Как показали исследования непрерывной круговой детонации, выполненные еще в 60-е годы [5], [1], фронт детонационного горения представляет собой сложную ударно-волновую структуру, состоящую как минимум из двух тройных конфигураций (о тройных конфигурациях ударных волн [3, 4]. Такая структура с присоединенной зоной детонации, как и любая термодинамическая система с обратной связью, оставленная в покое, стремится занять положение, соответствующее минимальному уровню энергии. В результате тройные конфигурации и область детонационного горения подстраиваются друг под друга так, чтобы фронт детонации перемещался по кольцевому зазору при минимально возможном для этого объеме детонационного горения. Это прямо противоположно той цели, которую ставят перед детонационным горением конструкторы двигателей.

Выводы

Для создания эффективного двигателя RDE необходимо решить задачу создания оптимальной тройной конфигурации ударных волн и организации в ней зоны детонационного сжигания. Оптимальные ударно-волновые структуры необходимо уметь создавать в самых разных технических устройствах, например, в оптимальных диффузорах сверхзвуковых воздухозаборников [2]. Основная задача – максимально возможное увеличение доли детонационного горения в объеме камеры сгорания с неприемлемых сегодняшних 15% до хотя бы 85%. Существующие проекты двигателей, основанные на схемах Николса и Войцеховского, не могут обеспечить выполнения данной задачи.

Список литературы

1. Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В., Топчий М.Е., Структура фронта детонации в газах. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.

2. Усков В.Н., Булат П.В. О задаче проектирования идеального диффузора для сжатия сверхзвукового потока // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 6 (ч. 1). – С. 178–184.

3. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. История изучения нерегулярного отражения скачка уплотнения от оси симметрии сверхзвуковой струи с образованием диска Маха // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 9 (ч. 2). – С. 414–420.

4. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. Обоснование применения модели стационарной Маховской конфигурации к расчету диска Маха в сверхзвуковой струе // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11 (ч. 1). – С. 168–175.

5. Щелкин К.И. Неустойчивость горения и детонации газов // *Успехи физических наук*. – 1965. – Т. 87, вып. 2. – С. 273–302.

6. Nichols J.A., Wilkmsn H.R., Morrison R.B. Intermittent Detonation as a Trust-Producing Mechanism // *Jet Propulsion*. – 1957. – № 21. – P. 534–541.

References

1. Vojcehovskij B.V., Mitrofanov V.V., Topchijan M.E., *Struktura fronta detonacii v gazah*, Novosibirsk, Izd-vo SO AN SSSR, 1963.

2. Uskov V.N., Bulat P.V. O zadache proektirovanija ideal'nogo diffuzora dlja szhatija sverhzvukovogo potoka // *Fundamental'nye issledovanija*. 2012. no. 6 (chast' 1). pp. 178–184;

3. Uskov V.N., Bulat P.V., Prodan N.V. Istorija izuchenija nereguljarnogo otrazhenija skachka uplotnenija ot osi simmetrii sverhzvukovoj strui s obrazovaniem diska Maha // *Fundamental'nye issledovanija*. 2012. ni. 9 (chast' 2). pp. 414–420.

4. Uskov V.N., Bulat P.V., Prodan N.V. Obosnovanie primenenija modeli stacionarnoj Mahovskoj konfiguracii k raschetu diska Maha v sverhzvukovoj strue // *Fundamental'nye issledovanija*. 2012. no. 11 (chast' 1). pp. 168–175.

5. Shhelkin K.I. Neustojchivost' gorenija i detonacii gazov. *Uspehi Fizicheskikh Nauk*. T. 87. Vol. 2. 1965. Oktjabr', pp. 273–302.

6. Nichols J.A., Wilkmsn H.R., Morrison R.B. Intermittent Detonation as a Trust-Producing Mechanism. *Jet Propulsion*, 21, 1957. pp. 534–541.

Рецензенты:

Усков В.Н., д.т.н., профессор кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета, математико-механический факультет, г. Санкт-Петербург;

Емельянов В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 14.10.2013.