

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
 НЕПРЕРЫВНО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ
 В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ШИРОКИМ
 ЗАЗОРОМ ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕ ГОРЮЧЕГО
 И ОКИСЛИТЕЛЯ

С. М. Фролов, А. В. Дубровский, В. С. Иванов

ИХФ РАН, Центр ИДГ
 г. Москва, Россия

Современные силовые установки в авиации представлены, в основном, газотурбинными двигателями (ГТД), работающими по термодинамическому циклу Брайтона. Этот же цикл широко используется в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД). В течение многих десятков лет ГТД и ЖРД непрерывно совершенствовались, и их дальнейшее улучшение требует больших капитальных вложений. Альтернативное решение, позволяющее существенно повысить термодинамическую эффективность современных ГТД и ЖРД, — использование камер сгорания с повышением полного давления. Повышение полного давления в камере сгорания можно обеспечить увеличением скорости горения смеси горючего с окислителем и/или изменением режима горения. По своей термодинамической эффективности наиболее привлекательный режим быстрого горения — это детонация [1, 2]. В детонационной волне достигается максимальная концентрация химической энергии, запасенной в горючем: энергия выделяется в тонком слое ударно-сжатой смеси. Известны две основные схемы организации детонационного горения [3]: в периодических детонационных волнах, бегущих вдоль камеры сгорания (импульсно-детонационные камеры), и в детонационных волнах, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек камеры сгорания (камеры сгорания с непрерывной детонацией, КСНД). Обе схемы считают перспективными как для воздушно-реактивных, так и для ракетных двигателей.

В 2010 г. в лаборатории детонации ИХФ РАН была поставлена задача — разработать научные основы проектирования КСНД для энергетики и транспорта. В том же году была разработана вычислительная программа, позволяющая проводить полномасштабное трехмерное моделирование рабочего процесса в КСНД [4].

В [5, 6] рассмотрена кольцевая камера сгорания, работающая на гомотогенной стехиометрической водородно-воздушной смеси, подаваемой через форсуночную головку с кольцевыми отверстиями относительно малой ши-

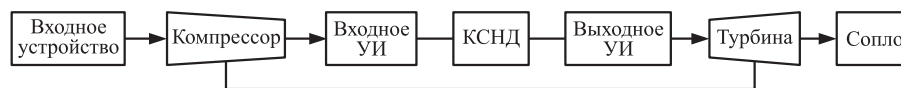


Рис. 1 Схема ГТД с КСНД

рины (~ 7 мм). Показано, что КСНД — это камера сгорания с повышением полного давления: в расчетах полное давление в камере повышалось на 10%–14%. При моделировании особое внимание уделено характеристикам течения во входном и выходном устройствах-изоляторах (УИ), отделяющих КСНД от компрессора и турбины ГТД (рис. 1). Оказалось, что для КСНД выбранной геометрии УИ простейшей кольцевой формы не обеспечивают демпфирование пульсаций давления: амплитуда пульсаций давления во входном и выходном УИ достигала очень высоких значений на уровне (40%–45%) P_{in} и (30%–35%) P_{in} соответственно, где P_{in} — давление за последней ступенью компрессора ГТД.

В [7] впервые проведено трехмерное численное моделирование рабочего процесса в кольцевой КСНД при раздельной подаче топливных компонентов — водорода и воздуха, причем конструкция камеры сгорания и основные режимные параметры были такими же, как в экспериментах [8, 9]: воздух в камеру подавали в осевом направлении через кольцевую щель шириной 2 мм, а водород — через множество радиальных отверстий субмиллиметрового размера. В расчетах приняты во внимание эффекты, связанные с конечными скоростями турбулентного и молекулярного смешения топливных компонентов друг с другом и с продуктами детонации, а также химических превращений. Результаты расчетов в целом соответствовали экспериментальным наблюдениям по всем интегральным характеристикам рабочего процесса (давление в КСНД, расходы топливных компонентов, высота детонирующего слоя).

Данное сообщение — продолжение исследований [5–7]. Конкретная цель этой работы — методами численного моделирования доказать возможность интеграции КСНД в ГТД, т. е. доказать возможность организации рабочего процесса в кольцевой камере сгорания с широким зазором (сопоставимым с высотой лопатки последней ступени компрессора) при раздельной подаче горючего и окислителя. Главная задача, решаемая в данной работе, — спроектировать входное УИ, обеспечивающее демпфирование пульсаций давления за последней ступенью компрессора ГТД.

На рис. 2 представлено схематическое изображение КСНД с кольцевым зазором шириной $\delta = 23$ мм с присоединенным входным УИ в виде кольцевой расширительной камеры. Конструкция УИ и деталей его сопряжения с КСНД — предметы патентования и здесь не обсуждаются. Окислитель (воздух) под давлением $P_{in} = 9$ атм при температуре 550 К подается в КСНД через входное УИ в осевом направлении. Горючее (водород) подается

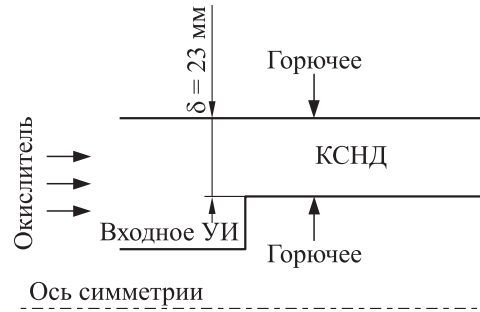


Рис. 2 Схематическое изображение КСНД с входным УИ. Штрихпунктирная линия — ось КСНД

в КСНД из топливных коллекторов (на рис. 2 не показаны) через 80 радиальных форсуночных отверстий — 40 в наружной стенке и 40 во внутренней стенке. Давление и температура водорода на входе в топливные коллекторы поддерживаются постоянными и равными 27 атм и 298 К. К выходному сечению КСНД присоединено расширяющееся сопло с центральным телом в виде конуса и ресивер (на рис. 2 не показаны), объем которого многократно превышает объем самой камеры. На границах ресивера задается условие фон Неймана $\text{grad}(P) = 0$. Специальные расчеты показали, что условия на границах ресивера никак не влияют на структуру течения в КСНД.

Математическая постановка задачи, метод расчета и процедура иницирования детонации в КСНД детально описаны в [5–7]. Расчеты проводились на структурированной сетке с 415 000 гексагональных ячеек размером от 2 до 5 мм. Несмотря на то что на такой расчетной сетке внутренняя структура детонационного фронта не разрешалась, применение «подсеточного» метода частиц позволяло учесть влияние продольных и поперечных акустических волн на химические превращения внутри расчетной ячейки. Шаг интегрирования по времени не превышал 1 мкс.

Иницированию детонации предшествовала продувка КСНД топливными компонентами. На рис. 3 показаны последовательные расчетные распределения массовой доли водорода в поперечном сечении КСНД, расположенном на осевом расстоянии 20 мм ниже по течению от отверстий подачи водорода, за первые 30 мкс продувки. Видно, что в указанном сечении через ~ 20 мкс после начала продувки водородно-воздушная смесь имеет состав, близкий к стехиометрическому, однако смесь периодически стратифицирована: слои смеси, обогащенной горючим, перемежаются со слоями, обедненными горючим.

Через 3–4 мс после иницирования детонации в КСНД устанавливается периодический рабочий режим с одной детонационной волной, распространяющейся в кольцевом зазоре со средней скоростью 1950 м/с. Установившаяся

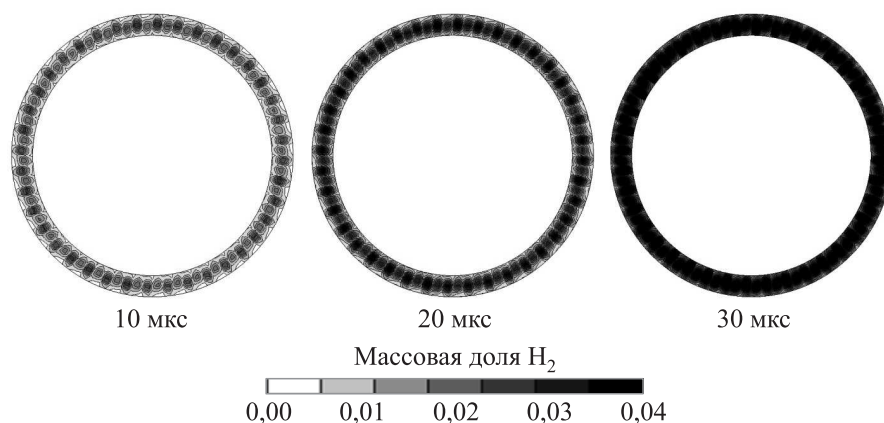


Рис. 3 Мгновенные распределения массовой доли водорода в поперечном сечении КСНД в разные моменты времени после начала продувки

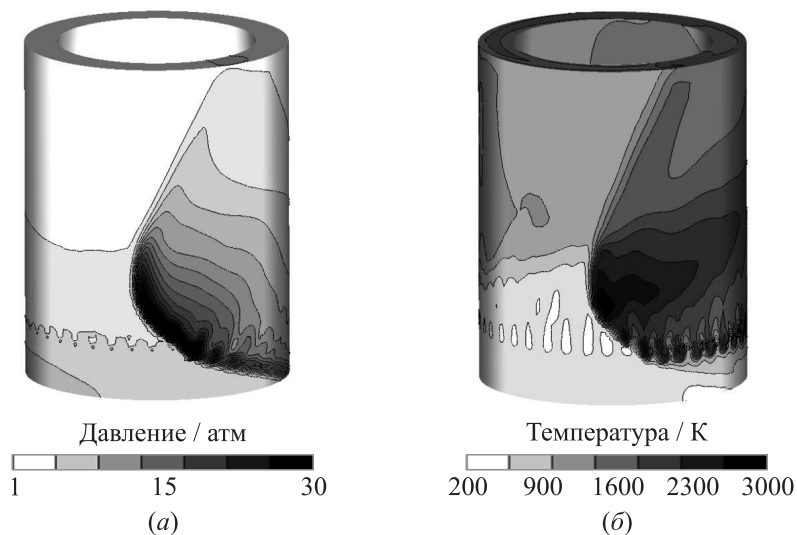


Рис. 4 Мгновенные распределения давления (а) и температуры (б) в окрестности внешней стенки КСНД в условиях периодического рабочего режима с одной детонационной волной. Детонация распространяется справа налево

частота вращения детонационной волны приблизительно равна 2 кГц. На рис. 4 показаны мгновенные расчетные распределения давления (а) и температуры (б) в окрестности внешней стенки КСНД в условиях периодического рабочего режима с одной детонационной волной. Детонация распространя-

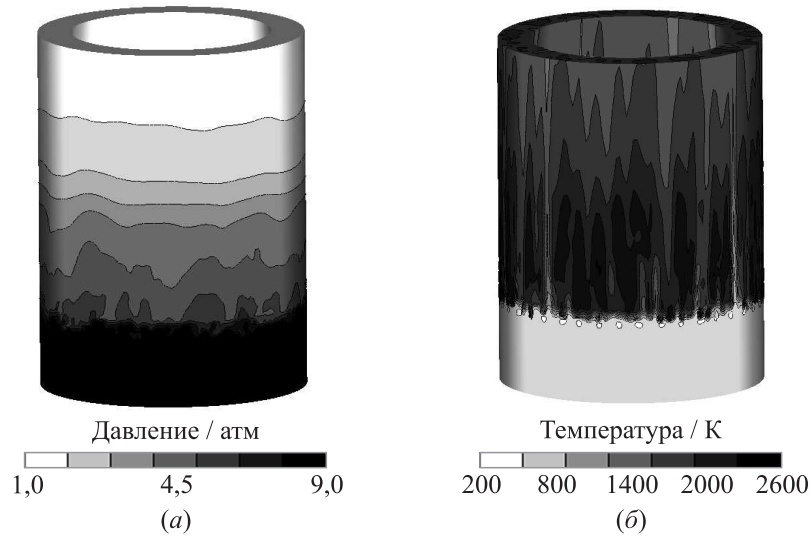


Рис. 5 Мгновенные распределения давления (а) и температуры (б) в окрестности внешней стенки кольцевой камеры в условиях установившегося диффузионного горения (дефлаграции)

ется справа налево. Видно, что водородно-воздушная смесь перед детонационной волной периодически стратифицирована не только по составу (см. рис. 3), но и по температуре (см. рис. 4, б), поскольку воздух поступает во входное УИ с температурой 550 К, а водород, расширяясь в форсуночных отверстиях охлаждается до температуры ~ 200 К. Кроме периодической стратификации смеси по температуре и составу в поперечных сечениях КСНД расчет демонстрирует существенное изменение температуры и состава водородно-воздушной смеси по высоте кольцевого слоя перед детонационной волной. По этой причине фронт волны сильно искривлен, причем его верхняя часть опережает нижнюю приблизительно на 2δ , а высота фронта приблизительно составляет $4,5\delta$ (~ 100 мм).

Для сравнения на рис. 5 показаны мгновенные расчетные распределения давления (а) и температуры (б) в окрестности внешней стенки в условиях установившегося диффузионного горения (дефлаграции) в той же кольцевой камере. Режим дефлаграции получали путем равномерного зажигания смеси горячим источником во всей кольцевой области над отверстиями подачи водорода. В таком режиме горение охватывает все поперечное сечение камеры, а давление и температура монотонно уменьшаются по направлению к соплу.

На рис. 6 представлены расчетные зависимости статического давления от времени в двух точках: в точке, расположенной на расстоянии 50 мм над

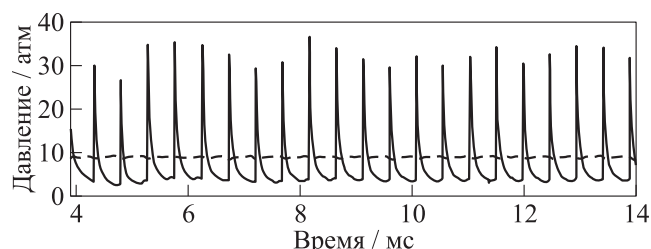


Рис. 6 Расчетные зависимости статического давления от времени в двух точках: в точке, расположенной в КСНД (сплошная кривая), и в точке, расположенной во входном УИ (штриховая кривая)

отверстиями подачи водорода (сплошная кривая), и в точке, расположенной во входном УИ (штриховая кривая) при работе камеры в режиме детонации.

Важнейший результат данной работы — доказательство того, что с помощью входного УИ определенной конструкции можно обеспечить практически полное демпфирование пульсаций давления за последней ступенью компрессора ГТД с камерой сгорания, работающей в детонационном режиме. Действительно, максимальное отклонение штриховой кривой от прямой линии на рис. 6 составляет всего 3% P_{in} . При этом максимальное среднее статическое давление в КСНД составляет 8,6 атм. Что касается полного давления, то его расчетное распределение в КСНД в периодическом детонационном режиме показано на рис. 7 сплошной кривой. Для сравнения штриховой кривой показано распределение полного давления в той же камере сгорания в установившемся дефлаграционном режиме. Из рис. 7 видно, что в отличие от дефлаграционного режима, в котором полное давление вдоль оси

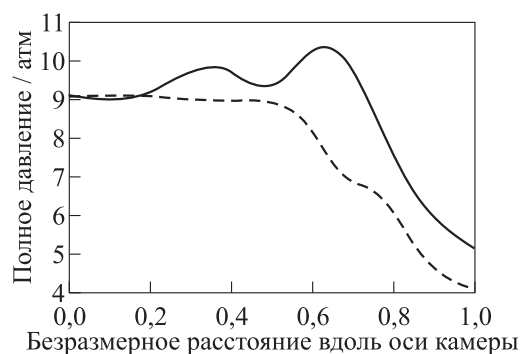


Рис. 7 Расчетные распределения осредненного по сечению полного давления вдоль оси кольцевой камеры сгорания при детонации (сплошная кривая) и дефлаграции (штриховая кривая)

камеры уменьшается, в детонационном режиме рабочий процесс протекает с повышением полного давления до 10,3 атм, т. е. на 14%–15% выше $P_{ин}$.

Таким образом, методами численного моделирования доказана возможность организации циклического рабочего процесса с отдельной подачей горючего и окислителя в кольцевой камере сгорания с непрерывной детонацией, имеющей широкий кольцевой зазор, сопоставимый с высотой лопатки последней ступени компрессора ГТД. Предложена конструкция входного УИ КСНД, обеспечивающая практически полное демпфирование пульсаций давления за компрессором. При этом в КСНД достигнуто 15-процентное повышение полного давления.

Работа выполнена при частичной поддержке Центра импульсно-детонационного горения, Российской академии наук (Программа Президиума РАН № 26 «Горение и взрыв») и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-01297).

Литература

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. № 17. С. 1453–1461.
2. Войцеховский Б. В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР, 1959. Т. 129. № 6. С. 1254–1256.
3. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.
4. Фролов С. М. Об управлении рабочим процессом в камерах сгорания с вращающейся детонацией // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. Вып. 4. С. 355–360.
5. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Хим. физика, 2012. Т. 31. № 3. С. 32–45.
6. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией при отдельной подаче горючего и окислителя // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 1. С. 1–10.
7. Frolov, S. M., A. V. Dubrovskii, and V. S. Ivanov. 2013. Three-dimensional numerical simulation of operation process in rotating detonation engine. In: *Progress in propulsion physics*. Eds. L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, and S. Frolov. EUCASS advances in aerospace sciences book ser. EDP Sciences – TORUS PRESS. 4:467–88.
8. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация топливно-воздушных смесей // ФГВ, 2006. Т. 42. № 4. С. 1–9.
9. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация водородовоздушной смеси с добавкой воздуха в продукты и зону смесеобразования // ФГВ, 2010. Т. 46. № 1. С. 60–68.