

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИИ
ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ
В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

А. В. Дубровский¹, В. С. Иванов², С. М. Фролов²

¹НИЯУ-МИФИ
г. Москва, Россия
²ИХФ РАН
г. Москва, Россия

В настоящее время силовые установки в авиации представлены, в основном, газотурбинными двигателями (ГТД), работающими по термодинамическому циклу Брайтона. В течение 60–70 лет ГТД непрерывно совершенствовались, и дальнейшее продвижение на этом пути возможно лишь при широком использовании новых дорогостоящих технологий и жаропрочных материалов. Одно из альтернативных решений, потенциально позволяющее существенно повысить термодинамическую эффективность современных ГТД, — использование камер сгорания с повышением полного давления. Повышения полного давления в камере сгорания можно добиться, увеличивая скорость горения топливно-воздушной смеси (ТВС) и/или изменяя режим горения. Наиболее привлекательным (по термодинамической эффективности) режимом быстрого горения является детонация [1]. В детонационной волне достигается максимальная концентрация химической энергии, запасенной в ТВС: энергия выделяется в тонком слое ударно-сжатой смеси, обладающей огромной кинетической энергией. Известно несколько схем организации детонационного горения [2]. Наиболее часто обсуждаются две схемы: горение в периодических детонационных волнах, бегущих вдоль камеры сгорания (импульсно-детонационные камеры), и в детонационных волнах, непрерывно циркулирующих в тангенциальном направлении поперек камеры сгорания (камеры с непрерывной де-

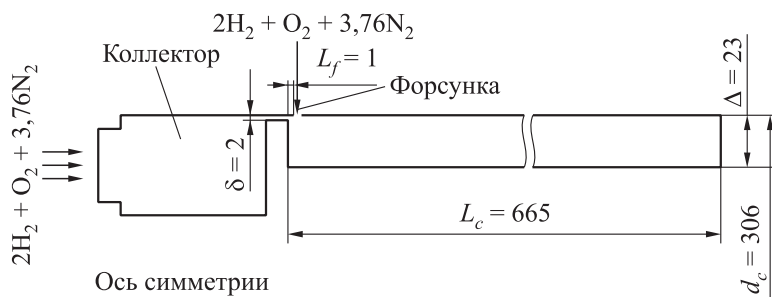


Рис. 1 Геометрия расчетной области. Размеры указаны в миллиметрах

тонацией, КНД). Первую схему рассматривают, главным образом, применительно к прямоточным реактивным двигателям. Вторую же схему считают перспективной для ГТД. Данная работа — продолжение цикла работ авторов [3–7] по исследованию возможности интеграции КНД в ГТД.

Для точного моделирования, оптимизации и определения области существования устойчивого рабочего процесса в КНД необходима тщательная проверка математической модели, используемой в расчетах путем сравнения с имеющимися экспериментальными данными. Ниже приведены результаты численного моделирования непрерывной детонации стехиометрической водородно-воздушной смеси в проточной кольцевой камере, имеющей такую же конструкцию, как в [8].

Расчетная область представляла собой осесимметричный кольцевой канал (рис. 1) с наружным диаметром $d_c = 306$ мм, длиной $L_c = 665$ мм и шириной $\Delta = 23$ мм. В экспериментах [8] компоненты смеси — воздух и водород поступали в камеру отдельно: воздух поступал через кольцевую щель шириной $\delta = 2$ мм, а водород — через радиальные отверстия, расположенные равномерно по всей наружной стенке камеры на расстоянии $L_f = 1$ мм вниз по потоку от кольцевой щели и имеющие общую площадь сечения $S_f = 15$ см².

В отличие от [8], в наших расчетах в кольцевую щель и через радиальные отверстия в наружной стенке поступала стехиометрическая водородно-воздушная смесь. Это сделано для того, чтобы

упростить задачу, исключив на первом этапе исследований эффекты смесеобразования и используя простую одноступенчатую кинетику высокотемпературного самовоспламенения водорода.

Математическая постановка задачи, метод расчета и способ иницирования детонации детально описаны в [7], причем в [7] рассматривалась упрощенная конструкция КНД с широкой кольцевой щелью и без радиальных отверстий для подачи смеси. Как и в [7], течение вязкого сжимаемого газа в расчетной области описывали усредненными по Рейнольдсу трехмерными нестационарными уравнениями Навье–Стокса, энергии и неразрывности химических компонентов смеси. Турбулентные потоки вещества, количества движения и энергии моделировали с помощью стандартной k - ε модели турбулентности. Ввиду того что химические превращения в КНД протекают в основном в бегущей волне детонации, вкладом фронтального горения в химические источники в уравнении энергии и в уравнениях неразрывности для компонентов смеси пренебрегали. Численное решение определяющих уравнений задачи проводили с использованием сопряженного алгоритма «метод контрольных объемов – метод Монте-Карло».

Расчетная сетка КНД содержала 1 млн ячеек. На входе в коллектор задавали постоянную температуру водородно-воздушной смеси и постоянный массовый расход G_{in} . В начальный момент времени в коллекторе задавали однородные распределения статического давления p_p и температуры T_p . В радиальные отверстия подавали стехиометрическую водородно-воздушную смесь со скоростью U_r и с температурой T_r .

Расчеты в [7] показали, что рабочий процесс в КНД идет с повышением полного давления, но сопровождается очень большими средними тепловыми потоками в стенки камеры (на уровне 3 МВт/м^2) и высокими температурами в ее выходном сечении (на уровне 2500 К). Это приводит к необходимости поиска эффективных путей охлаждения стенок и продуктов детонации. На рис. 2 представлен пример расчетных распределений полного давления (рис. 2, *a*), статической температуры (рис. 2, *б*), массовой доли водорода (рис. 2, *в*) и теплового потока (рис. 2, *г*) на внутренней стенке КНД для случая, когда $T_{in} = 300 \text{ К}$, $G_{in} = 3,4 \text{ кг/с}$, $p_p = 15 \text{ атм}$, $T_p = 300 \text{ К}$, $U_r = 475 \text{ м/с}$ и $T_r = 350 \text{ К}$. Все показанные распределения соответствуют решению в ближайшей окрестности внутренней стенки КНД. В рассматрива-

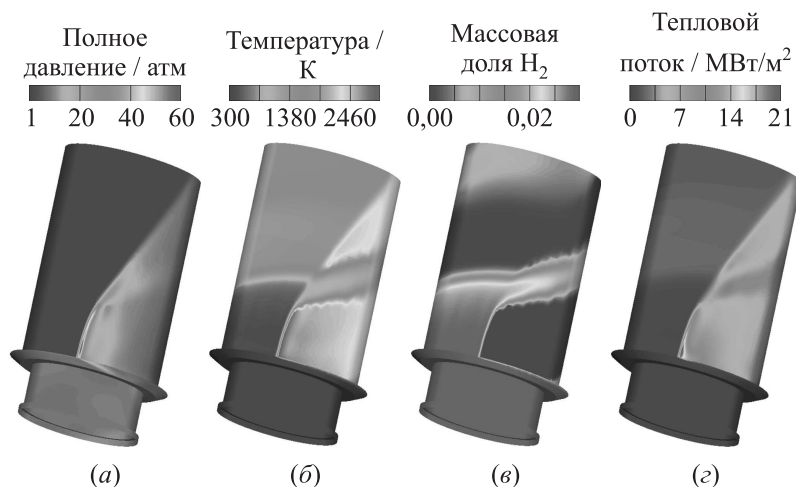


Рис. 2 Расчетные распределения полного давления (а), статической температуры (б), массовой доли водорода (в) и теплового потока (г) во внутреннюю стенку в момент времени $t = 2$ мс

емом примере вблизи внутренней стенки наблюдается недогорание горючей смеси в детонационной волне (см. рис. 2, в). Это связано с неоднородным заполнением КНД смесью, поступающей с разной скоростью в осевом и радиальном направлениях. Возникающая при этом «завеса» из несгоревшей смеси охлаждает стенку камеры (см. рис. 2, г) и продукты детонации (см. рис. 2, б) — эффект, который можно использовать для охлаждения стенок и продуктов детонации при раздельной подаче компонентов смеси и при соответствующей организации течения в КНД. В отличие от КНД, рассмотренной в [7], в камере [8] с очень узкой кольцевой щелью ($\delta = 2$ мм) среднее полное давление не увеличивается, а уменьшается (см. рис. 2, а), что вызвано высоким уровнем необратимых потерь.

На рис. 3 показан пример расчетных зависимостей параметров рабочего процесса в КНД от времени в течение 5 последовательных пробегов детонационной волны по кольцевому каналу, начиная с момента инициирования детонации. Эти зависимости построены для точки, расположенной вблизи внутренней стенки КНД на расстоянии 5 мм от днища камеры вниз по потоку. Средняя ско-

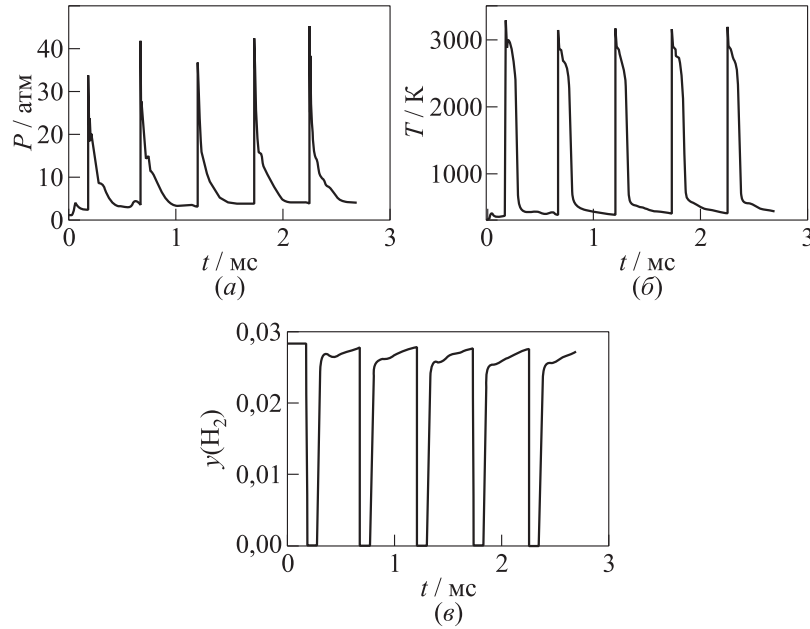


Рис. 3 Расчетные зависимости статического давления (*a*), статической температуры (*б*), массовой концентрации водорода (*в*) от времени в точке, расположенной на расстоянии 5 мм от торцевой камеры на внутренней стенке

рость детонации здесь приблизительно равна 1580 ± 50 м/с, что на 20% ниже термодинамической скорости детонации Чепмена–Жуге для стехиометрической водородно-воздушной смеси при нормальных начальных условиях (~ 1970 м/с). Судя по кривым давления (рис. 3, *a*) и длительности «провалов» на кривой для концентрации водорода (рис. 3, *в*), продолжительность перерывов в подаче смеси в камеру составляет ~ 100 мкс, а частота вращения детонации — $\sim 1,7$ кГц. Пульсации статического давления в центре входного коллектора оказались на уровне ± 1 атм ($\sim 7\%$ от начального давления 15 атм). Что касается параметров в выходном сечении КНД, то пульсации статической температуры здесь достигали ± 250 К при среднем уровне 1750 К, а пульсации давления — ± 2 атм при среднем уровне 6 атм.

Таким образом, проверочные расчеты с подачей гомогенной смеси показали, что применяемая расчетная методика позволяет определить область существования детонации в КНД, которая оказалась близкой к экспериментальным результатам [8]. На следующем этапе работы будет решена задача о непрерывной детонации в камере с раздельной подачей водорода и воздуха и проведено прямое сравнение с экспериментальными данными [8].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (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. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. 592 с.
3. Фролов С. М. Об управлении рабочим процессом в камерах сгорания с вращающейся детонацией // Горение и взрыв / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. Вып. 4. С. 355–360.
4. Фролов С. М. Управляемая газовая детонация // Тезисы докладов Междунар. конф. «Неизотермические явления и процессы: от теории теплового взрыва к структурной макрокинетике», посвященной 80-летию акад. А. Г. Мержанова. — Черноголовка: ИСМАН, 2011. С. 50–51.
5. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с вращающейся детонацией // Химическая физика вчера, сегодня, завтра / Под общ. ред. акад. А. А. Берлина. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. С. 38.
6. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Камера сгорания с вращающейся детонацией: проблемы интеграции в газотурбинный двигатель // Второй Минский междунар. colloquium по физике ударных волн, горения и детонации. — Минск: Изд-во ИТМО НАН Беларуси, 2011. С. 41–42.
7. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Химическая физика, 2012. Т. 31. № 1.
8. 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.