

шают интенсивность (до тех пор пока детонация не превратится в волну Чепмена–Жуге) и препятствуют превращению части энергии, выделяющейся при сгорании топлива в полезную работу. При этом вариант 1 позволяет достичь существенно большей равномерности продольной нагрузки.

Для демонстрации влияния внешнего обтекания и способа возобновления рабочего цикла рассмотрели также ИДД бесклапанной схемы (рис. 3, б), конструкция которого близка к рассмотренной в [7]. Такая упрощенная модельная схема ИДД, хотя и не обеспечивает равномерной по времени полезной силы, зато позволяет провести параметрические расчеты в осесимметричной постановке. Мы представим результаты расчетов для режима внешнего обтекания с числом Маха $M = 3$ при двух расположениях поджига (1 и 2 на рис. 3, б), которые обеспечивают движение детонационной волны вверх и вниз по потоку.

С. М. Фролов

Об управлении рабочим процессом в камерах сгорания с вращающейся детонацией

Я хочу привлечь внимание к очень, на мой взгляд, многообещающей схеме устройства для управляемого детонационного сжигания горючего. Это схема камеры сгорания с вращающейся детонацией, впервые предложенная в СССР Б. В. Войцеховским в 1959 г. [8]. Впоследствии с этой схемой активно работали несколько научных групп у нас в стране (ИГиЛ СО РАН) и за рубежом (США, Польша, Франция, Япония и Китай).

Чтобы понять, как работает такая камера сгорания, рассмотрим кольцевой канал, образованный стенками двух коаксиальных цилиндров одинаковой длины. Если к днищу цилиндров приладить смесительную головку и обеспечить подачу компонентов горючего в кольцевой зазор, а другой конец канала оборудовать реактивным соплом, получится проточный кольцевой реактор. Организовать горение в таком реакторе можно по-разному: как в обычном жидкостном ракетном двигателе (ЖРД) или по схеме Войцеховского, когда смесь сгорает в детонационных волнах, бегущих в одном (тангенциальном) направлении вдоль днища кольцевого канала. Дето-

национная волна «съедает» горючую смесь, вновь поступившую в камеру сгорания в «хвосте» за передней волной или за время своего оборота по окружности кольцевого канала (если волна одна). Круговая частота детонационных волн в камерах средних размеров имеет величину порядка 10^5 об/мин и выше. Чтобы отличать такой реактор от ЖРД, будем называть его двигателем с вращающейся детонацией (ДВД).

Как известно, в детонационной волне химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоких избыточных давлениях и температурах. Поэтому эффективность процесса горения в ДВД при прочих равных условиях будет выше, чем в ЖРД (процесс протекает при более высоких давлениях за ударной волной [9]). По крайней мере, теоретически применение ДВД сулит большие выгоды для аэрокосмической техники и энергетики. В частности, ввиду того, что горючее в ДВД горит непрерывно, на выходе из сопла можно установить турбину, которая будет размещена на общем валу с компрессором, обеспечивающим подачу воздуха в кольцевую камеру сгорания. Если учесть, что частота вращения турбины имеет величину порядка 10^4 об/мин, за один оборот турбины детонационная волна сделает десять и более оборотов, т. е. поток выхлопных газов через венцы турбины будет практически равномерным. В такой конфигурации ДВД очень похож на турбореактивный двигатель (ТРД), только вместо непрерывного горения в кольцевой камере непрерывно циркулирует детонация. Если к валу турбины присоединить электрогенератор и утилизировать энергию истекающих газов, полученная машина может стать эффективной стационарной энергетической установкой.

На сегодняшний день наибольших успехов в организации непрерывного детонационного горения добились наши коллеги из Новосибирска (Ф. А. Быковский, А. А. Васильев, Е. Ф. Ведерников и С. А. Ждан; большой вклад в решение проблемы внес ушедший из жизни В. В. Митрофанов). Ими проведены систематические экспериментальные исследования непрерывно вращающейся детонации в проточных кольцевых и дисковых камерах сгорания разной конструкции как с топливно-кислородными, так и с топливно-воздушными смесями, с газовым и жидким горючим, а недавно они опубликовали результаты успешных опытов по детонационному сжиганию смесей древесно-угольной пыли с воздухом.

Несмотря на эти успехи, о практическом применении ДВД пока говорят с большой долей осторожности. Дело в том, что тепловые потоки в стенки камеры сгорания в окрестности смесительной головки, где циркулируют детонационные волны, достигают колоссальных значений. Чтобы камера не разрушилась, ее надо изготавливать из сверхжаропрочных материалов и дополнительно охлаждать. Неудивительно, что время работы существующих лабораторных образцов ДВД составляет всего доли секунды или, в лучшем случае, несколько секунд.

Кроме проблемы охлаждения существует и множество других проблем, связанных с организацией рабочего процесса и его управлением. Достаточно перечислить лишь несколько сопутствующих физико-химических явлений, чтобы понять всю сложность процесса. Для устойчивой («стационарной») циркуляции детонационной волны необходимо, чтобы состояние горючей смеси перед бегущим фронтом не изменялось или изменялось настолько незначительно, чтобы это не отражалось на скорости и структуре волны. Этого можно добиться, только обеспечив (в среднем) стационарные условия подачи и смешения горючего и окислителя, исключив возможность самопроизвольного зажигания свежей смеси на горячих боковых поверхностях камеры в окрестности смесительной головки, и сведя к минимуму горение смеси на развитой контактной границе с горячими продуктами детонации за фронтом волны. Следует иметь в виду, что тангенциальное распространение детонационной волны в кольцевом канале конечной кривизны сопровождается дифракционными явлениями на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях. Это приводит к образованию «наведенных» поперечных волновых структур, взаимодействующих с собственными бегущими поперечными волнами детонационного фронта. В местах столкновения поперечных волн разных структур то и дело могут возникать области с аномально высоким давлением, значительно превышающим давление подачи топливных компонентов в питающих магистралях смесительной головки, или с пониженным давлением. Первое приведет к проникновению продуктов детонации в отверстия головки, а второе — к преждевременной подаче топливных компонентов в продукты детонации. Картина усугубляется тем, что для полного молекулярного смешения топливных компонентов между собой необходимо конечное время, т. е. вблизи сме-

сительной головки имеется слой вещества, не способного к детонационному превращению. Этот слой, по-видимому, подвергается сжатию и разогреву в косом ударном фронте, присоединенном к детонационной волне. Если еще учесть, что течение за фронтом детонационной волны подвержено сильному боковому расширению (по направлению к соплу), становится очевидным, что картина течения в целом существенно нестационарная и трехмерная.

Приведенные выше рассуждения относятся к «стационарному» режиму работы ДВД. В переходных процессах, таких как запуск или повторный пуск двигателя, смена рабочего режима и т. д., ситуация еще сложнее. Разумеется, чтобы выделить определяющие факторы в этой сложной картине и попытаться выйти на практические рекомендации, необходимо привлекать самые современные численные методы решения задач газовой динамики.

До сих пор анализ этой задачи проводился лишь на основе невязких уравнений течения в плоской постановке с периодическими граничными условиями на концах рассматриваемого интервала. Фактически во всех проведенных исследованиях решалась задача на установление стационарного решения. При этом игнорировались эффекты кривизны траектории детонационной волны и эффекты, связанные с конечной скоростью турбулентного и молекулярного смещения топливных компонентов друг с другом и с продуктами детонации. В такой постановке невозможно определить тепловые потоки в стенку камеры и их пространственное распределение и в полной мере исследовать устойчивость решения к тем или иным случайным возмущениям.

По моему убеждению, в данном случае нельзя ограничиваться решением стационарной двумерной задачи. Необходимо решать нестационарные трехмерные уравнения турбулентного сжимаемого реагирующего течения с учетом конечных скоростей химических превращений, используя геометрию кольцевой камеры сгорания и смесительной головки, максимально приближенную к реальной. Особенно внимательно следует отнестись к моделированию течения у днища камеры сгорания. В существующих моделях на днище ставятся граничные условия квазистационарного расхода для гомогенной горючей смеси: расход смеси определяется отношением давления в «ресивере» к локальному мгновенному значению давления на днище (с учетом запирания); отрицательный расход не допуска-

ется. Чтобы правильно моделировать течение у днища, необходимо включить в рассмотрение процессы истечения топливных компонентов из соответствующих «ресиверов» через отверстия в камеру сгорания.

В 2010 г. в лаборатории детонации ИХФ РАН начаты работы по нестационарному трехмерному численному моделированию рабочего процесса в ДВД. План работ включает следующие этапы:

- (1) предварительные расчеты с целью определения характерных времен сопутствующих физико-химических процессов;
- (2) численное моделирование запуска двигателя с кольцевой камерой сгорания простейшей геометрии;
- (3) определение условий выхода рабочего процесса на «предельный» цикл при простейших граничных условиях на днище камеры;
- (4) численное моделирование работы двигателя с ресиверами окислителя и горючего;
- (5) анализ течения в камере сгорания (устойчивость «предельного» цикла к разным возмущениям; полнота сгорания; степень равномерности потока в выходном сечении сопла, распределения тепловых потоков на внутренней и внешней стенках камеры и т. д.);
- (6) расчет суммарной осевой и тангенциальной силы, действующей на ДВД, с учетом инициирующего импульса;
- (7) расчет тяговых характеристик ДВД в условиях сверхзвукового полета;
- (8) расчет обтекания лопаток турбины продуктами детонации, истекающими из сопла ДВД;
- (9) формирование облика компоновочной схемы ДВД–турбина–сопло.

На этапе (4) планируется начать работы по проектированию и изготовлению лабораторного образца ДВД с его последующими испытаниями.

На рис. 5 представлен пример расчета, выполненного при решении задач этапа (3). Показано распределение давления в детонационной волне, распространяющейся против часовой стрелки в кольцевом слое стехиометрической водородно-воздушной смеси. Снизу

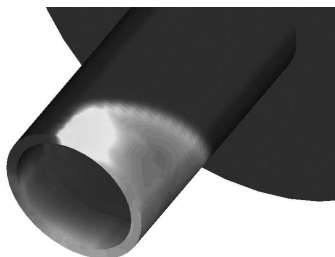


Рис. 5 Расчетное распределение давления в детонационной волне, распространяющейся в кольцевом слое стехиометрической водородно-воздушной смеси

через днище кольцевой камеры сгорания подается предварительно подготовленная горючая смесь. Сверху к камере присоединен большой буферный объем с воздухом при атмосферном давлении. На некоторой высоте внутренний цилиндр переходит в конус, образуя расширяющееся кольцевое сопло.

Н. А. Халтуринский

О снижении горючести полимеров

Я хотел бы обратить внимание на комплексную научную проблему снижения горючести полимеров, которая стала особенно актуальной ввиду крупных пожаров, происходящих в последнее время в РФ и за рубежом. Возникновение пожаров часто связывают с применением горючих материалов на основе полимеров.

Для снижения горючести полимеров необходимо рассматривать вопросы связанные с зажиганием, горением, дымообразованием, выделением токсичных продуктов при пиролизе и горении и пр.

Это большая комплексная проблема, решение которой под силу только крупным исследовательским центрам с новейшим оборудованием и творческим коллективом.

Для решения этой проблемы необходимо иметь представления о горении в целом, горении предварительно перемешанных смесей,