

ТЕЗИСЫ



1

2012

УДК 534.222.2

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ**С. М. Фролов***Институт химической физики им. Н. Н. Семенова, г. Москва, Россия*

В существующих силовых установках и горелочных устройствах химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет медленного горения – дефлаграции. Кроме дефлаграции известен и другой режим горения – детонация. При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоком давлении за сильной ударной волной. Если при дефлаграции воздушных смесей углеводородных горючих мощность тепловыделения с единицы площади поверхности фронта реакции составляет ~ 1 МВт/м², то мощность тепловыделения в детонационном фронте приблизительно на четыре порядка выше: $\sim 10\,000$ МВт/м². Кроме того, в отличие от продуктов медленного горения продукты детонации обладают огромной кинетической энергией: скорость продуктов детонации в ~ 20 – 25 раз выше скорости продуктов медленного горения. Если, например, вместо существующих камер сгорания (КС) с непрерывным горением использовать КС с непрерывно вращающейся детонацией или импульсно-детонационные КС с периодическим заполнением камеры горючей смесью и сгоранием смеси в бегущей детонационной волне (ДВ), то такие КС могли бы дать большие выгоды при использовании в энергетике благодаря энерговыделению с повышением давления и совмещению комбинированного ударно-волнового (механического) и теплового воздействий на объекты, обдуваемые продуктами детонации.

В работе рассмотрены физические принципы и проблемы организации циклического рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией (КСНД) и в импульсно-детонационном горелочном устройстве (ИДГУ). При обсуждении концепции КСНД основное внимание уделено проблемам, возникающим при проектировании КСНД в компоновке с устройствами, изолирующими КСНД от компрессора и турбины в газотурбинной энергетической установке, а также проблемам теплового состояния стенок камеры. Анализ проведен на примере трехмерного расчета рабочего процесса в кольцевой КСНД с внутренней и внешней стенками диаметром 260 и 306 мм с отдельной подачей топливных компонентов (осевой подачей воздуха через кольцевой зазор в днище камеры и с радиальной подачей водорода через множество отверстий по периметру внешней стенки) и с одной ДВ, вращающейся над днищем с частотой около 126 000 об/мин.

На рис. 1 показаны мгновенные расчетные распределения давления (*a*), температуры (*b*) и массовой доли кислорода (*в*) в срединном сечении кольцевого зазора. В отличие от существующих в настоящее время моделей рабочего процесса в КСНД, используемая в рассматриваемых расчетах модель учитывает микросмещение газов и возможность химических превращений в зонах смешения продуктов детонации с компонентами свежей горючей смеси. Из рисунка видно, что ДВ распространяется по существенно неоднородной среде с переменными температурой и химическим составом.

Оказалось, что в отсутствие изолирующих устройств уровень пульсаций статического давления на входе и выходе КСНД недопустимо велик. Следовательно, чтобы исключить нежелательные механические нагрузки на элементы компрессора и турбины, необходимо принимать специальные меры по ослаблению таких пульсаций. Расчеты местных и осредненных тепловых потоков в стенке КСНД показали, что местные тепловые потоки в

окрест
осрединици
расст
доказ
расст
пламе
управ
труба
непрерасст
Видн
затем
ско

окрестности дна достигали очень высоких значений – на уровне 10–15 МВт/м², а осредненные тепловые потоки были на уровне 2.5–3.5 МВт/м².

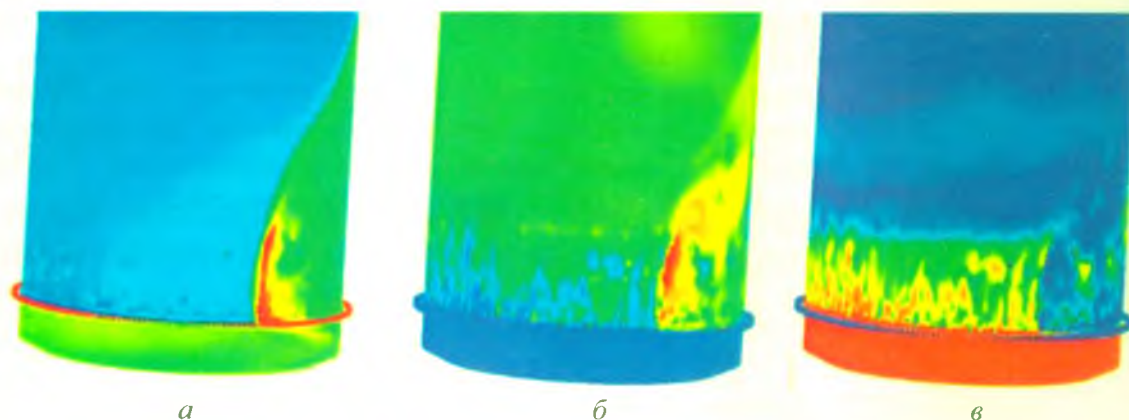


Рис. 1. Мгновенные распределения давления (*а*), температуры (*б*) и массовой доли кислорода (*в*) в срединном сечении кольцевого зазора КСНД, работающей на раздельной подаче воздуха и водорода. Детонация распространяется справа налево

При обсуждении концепции ИДГУ основное внимание уделено проблеме циклического инициирования ДВ через управляемый переход горения в детонацию (ПГД) на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания. Теоретически и экспериментально доказано, что решение этой проблемы следует искать в тщательном подборе формы и расстановки препятствий, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления ударной волны. Экспериментально продемонстрирована возможность управляемого циклического (с частотой до 2 Гц) ПГД в смеси природного газа с воздухом в трубах диаметром 94 и 150 мм с открытым концом на длине от 2.5 до 4 м при раздельной непрерывной подаче компонентов смеси и энергии зажигания на уровне 1 Дж.

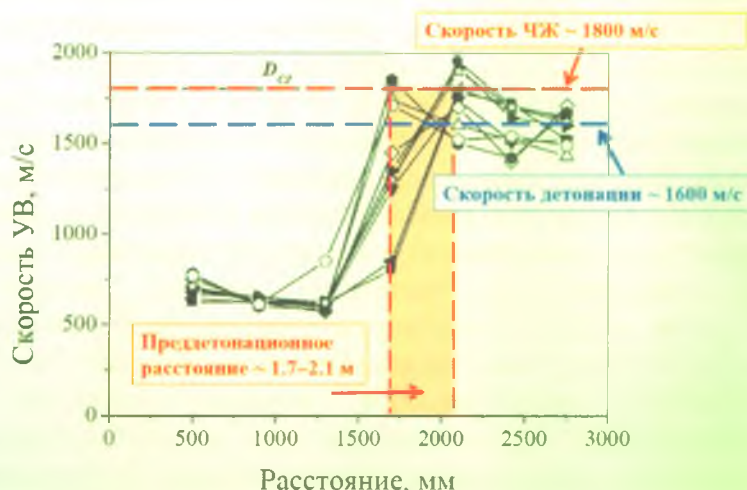


Рис. 2. Переход горения в детонацию в смеси природного газа с воздухом в десяти циклах работы ИДГУ при непрерывной раздельной подаче природного газа и воздуха

На рис. 2 представлены измеренные зависимости скорости УВ от пройденного расстояния в детонационной трубе диаметром 94 мм в десяти последовательных циклах. Видно, что ПГД в трубе происходит на расстоянии 1.7–2.1 м от начала трубы, а возникающая затем детонационная волна распространяется на длине ~1 м квазистационарно со средней скоростью около 1600 м/с. Наблюдаемый режим детонации следует рассматривать как

околопредельный. На основе экспериментальных исследований разработаны, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы ИДГУ – прообразы промышленных горелочных устройств для скоростного нагрева и фрагментации/газификации различных материалов, совмещающих комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое.

Работа выполнена при частичной поддержке Российской академии наук (Программа Президиума РАН № 26 «Горение и взрыв»), Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-01297) и Министерства науки и образования Российской Федерации (Государственный контракт № 16.526.12.6018 от 14 октября 2011 г.).