

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ
БЕЗ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

**С. М. Фролов, В. С. Аксёнов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов,
В. С. Иванов, А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк,
Ф. С. Фролов, И. О. Шамшин**

ИХФ РАН, Центр ИДГ
г. Москва, Россия

В течение 2010–2012 гг. в Центре импульсно-детонационного горения ИХФ РАН проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию принципиально новой научно-технической продукции — первой в мире энергосберегающей горелки импульсно-детонационной скоростной (ГИДС) с управляемым импульсно-детонационным горением природного газа [1–5]. Работы проводятся по Госконтракту с Минобрнауки РФ, согласно которому опытный образец ГИДС должен иметь следующие основные технические характеристики:

- тепловая мощность — от 2000 до 2500 кВт (соответствует мощности наиболее распространенных скоростных горелок обычного типа);
- максимальная скорость продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 400 до 1500 м/с;
- рабочая частота — регулируемая, от 0,01 до 2 Гц;
- максимальная температура продуктов детонации в выходном сечении — регулируемая, от 1400 до 2500 °С;
- максимальное избыточное давление продуктов детонации в выходном сечении — регулируемое, от 2 до 14 атм;
- энергия зажигания — не более 1,0 Дж;
- длина горелочного тракта — не более 5–6 м.

Указанные характеристики должны быть достигнуты при сниженном расходе природного газа и сниженной эмиссии оксидов азота по сравнению с существующими скоростными горелками равной тепловой мощности. Горелка предназначена для применения в нагревательных печах металлургической, металлопрокатной и других отраслей промышленности, а также в различных теплоэнергетических установках.

Цель данной работы — определение максимальной (стационарной) температуры элементов конструкции ГИДС при долговременных испытаниях опытного образца в импульсно-детонационном режиме с частотой 2 Гц без

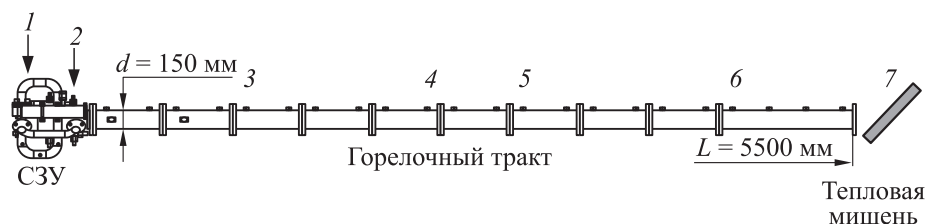


Рис. 1 Схема опытного образца ГИДС и точки установки термопар

принудительного охлаждения. Благодаря особенностям рабочего процесса ГИДС — периодическому заполнению горелочного тракта порцией холодной топливно-воздушной смеси с последующим сжиганием этой порции в бегущей детонационной волне и опустошением тракта от горячих продуктов детонации — ожидалось, что температура элементов конструкции должна достигнуть некоторого максимального стационарного значения. Знание такой стационарной температуры требуется для разработки энергоэффективной системы принудительного охлаждения ГИДС.

На рис. 1 показана схема опытного образца ГИДС с указанием точек установки 1–6 термопар и терморезисторов для измерения температуры элементов конструкции и термопар в тепловой мишени 7, расположенной на расстоянии 100 мм от открытого конца ГИДС. Опытный образец ГИДС содержит четыре основных узла: систему раздельной подачи природного газа и воздуха (на рис. 1 не показана); смесительно-зажигающее устройство (СЗУ), обеспечивающее смешение высокоскоростных потоков природного газа и воздуха и надежное зажигание образованной смеси; горелочный тракт — прямую трубу диаметром $d = 150$ мм и длиной $L = 5,5$ м — с системой специальных препятствий-турбулизаторов, обеспечивающих быстрый переход горения в детонацию [6]; цифровую систему управления (на рис. 1 не показана). Состав смеси на выходе из СЗУ до зажигания был близок к стехиометрическому, что подтверждено хроматографическим анализом проб, взятых по всей длине горелочного тракта. Стальная тепловая мишень массой 11 кг имела форму массивного диска, повернутого к оси горелочного тракта ГИДС под углом 45° .

Продолжительность экспериментов при работе ГИДС с частотой детонационных импульсов 2 Гц достигала 300 с.

Во время экспериментов с помощью аналого-цифрового преобразователя и компьютера непрерывно регистрировали не только сигналы термопар и терморезисторов, но и сигналы ионизационных зондов, установленных вдоль горелочного тракта для мониторинга скорости фронта реакции. Во всех рабочих циклах ГИДС скорость фронта реакции на расстоянии более 4,0 м от СЗУ превышала 1600–1650 м/с, что соответствует скорости детонации в стехиометрической метановоздушной смеси вблизи предела распростране-

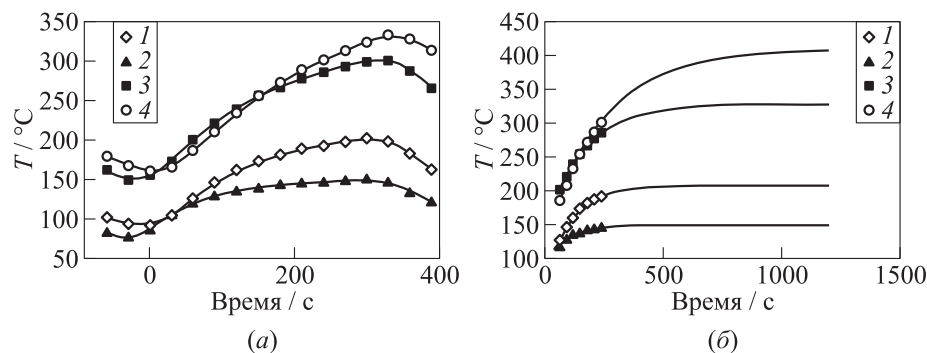


Рис. 2 Измеренные зависимости температуры разных элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы 300 с (а) и экстраполяция этих зависимостей на большую продолжительность работы (до 1200 с) (б): 1 — внешняя стенка СЗУ (позиция 1 на рис. 1); 2 — внешняя стенка СЗУ (позиция 2); 3 — внешняя стенка горелочного тракта (позиция 4); 4 — внешняя стенка горелочного тракта (позиция 6)

ния. В окрестности тех сечений горелочного тракта ГИДС, где происходил переход горения в детонацию, регистрировались скорости фронта реакции, превышающие 2000 м/с. По окончании эксперимента дополнительно проводились контрольные измерения температуры разных участков ГИДС и тепловой мишени при помощи тепловизора фирмы TESTO.

На рис. 2, а представлены измеренные зависимости температуры внешних стенок разных элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы 300 с. Для ускорения выхода ГИДС на стационарный тепловой режим перед началом эксперимента (отметка «0» на шкале времени t) все элементы горелочного тракта прогревались в процессе кратковременной работы ГИДС в непрерывном дефлаграционном режиме, поэтому в момент времени $t = 0$ элементы 1, 2, 4 и 6 (кривые 1–4 на рис. 2, а) имели разную температуру. По истечении 300 с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме подача топлива в СЗУ прекращалась и элементы ГИДС охлаждались высокоскоростным потоком воздуха, непрерывно подаваемым в СЗУ. Поэтому все температурные кривые на рис. 2, а имеют максимум, причем этот максимум достигается при $t > 300$ с вследствие инерционности тепловых процессов.

Из рис. 2, а видно, что температурные кривые для разных элементов ГИДС существенно отличаются друг от друга. За время опыта температуры элементов СЗУ 1 и 2 (кривые 1 и 2 на рис. 2, а) практически достигают стационарных значений 150 и 200 °C соответственно. Что касается элементов 4 и 6 горелочного тракта (кривые 3 и 4 на рис. 2, а), то их температурные кривые за время опыта не успевают выйти на стационарный

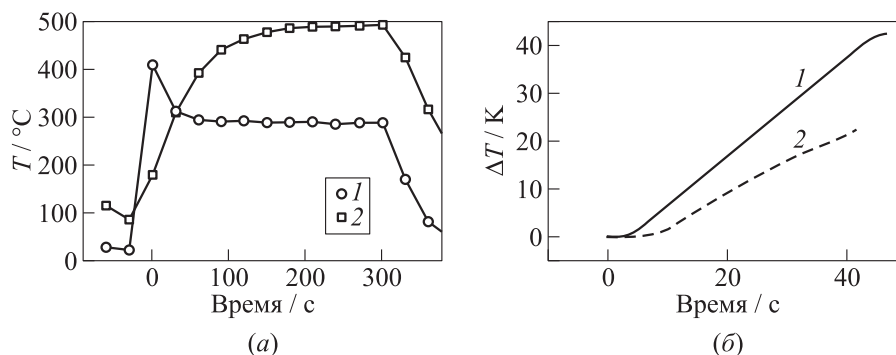


Рис. 3 (а) Измеренные зависимости температуры разных элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы 300 с: 1 — препятствие-турбулизатор (позиция 3 на рис. 1); 2 — препятствие-турбулизатор (позиция 5); (б) температурные кривые при нагреве тепловой мишени продуктами импульсной детонации (кривая 1) и импульсной дефлаграции (кривая 2)

уровень. Чтобы оценить стационарную температуру этих элементов, экспериментальные данные экстраполировали на большую продолжительность работы ГИДС (до 1200 с), используя экспоненциальную функцию. Результаты экстраполяции представлены на рис. 2, б. Из рис. 2, б следует, что элементы 4 и 6 горелочного тракта ГИДС (кривые 3 и 4 на рис. 2, б) могут прогреться до 330 и 420 °С соответственно. Отметим, что элемент 4 (см. рис. 1) расположен в той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегает» волна дефлаграции — комплекс, состоящий из головной ударной волны и фронта турбулентного пламени, разделенных слоем ударно сжатой взрывчатой смеси конечной толщины (порядка диаметра трубы). В отличие от элемента 4, элемент 6 (см. рис. 1) расположен в той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегает» волна детонации — комплекс, состоящий из головной ударной волны и примыкающего к ней фронта самовоспламенения. Поскольку у продуктов детонации температура и скорость выше, чем у продуктов дефлаграции, тот факт, что стационарная температура у элемента 6 оказалась выше, чем у элемента 4, вполне правомерен.

Кроме измерения температуры внешних стенок ГИДС были измерены температуры препятствий-турбулизаторов, установленных внутри горелочного тракта (элементы 3 и 5 на рис. 1), а также температура тепловой мишени (элемент 7 на рис. 1). Результаты этих измерений представлены на рис. 3, а и 3, б соответственно.

Из рис. 3, а видно, что в отличие от стенок горелочного тракта ГИДС ее внутренние элементы 3 и 5 достигают стационарной температуры 300 и

500 °С значительно быстрее — через 100 и 200 с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме. Отметим, что элемент 3 расположен там, где циклически «пробегают» волна дефлаграции, а элемент 5 — там, где циклически «пробегают» волна детонации. Известно, что элементы конструкций горелочных устройств могут в течение длительного времени выдерживать температуры до ~ 400 °С без принудительного охлаждения. Температура 500 °С для практического устройства представляется чрезмерно высокой, и, следовательно, для внутренних элементов ГИДС должно быть предусмотрено принудительное охлаждение. Из рис. 3, а следует, что такое охлаждение требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически «пробегают» волна детонации.

На рис. 3, б представлены температурные кривые для тепловой мишени, обдуваемой продуктами импульсной детонации (кривая 1) и импульсной дефлаграции (кривая 2) в двух разных опытах продолжительностью 40 с. Оба опыта проведены при одинаковых настройках системы подачи топливных компонентов и СЗУ, но с неполным заполнением горелочного тракта свежей смесью для обеспечения ее полного сгорания в каждом цикле. Опыт с импульсной детонацией был проведен с ГИДС той же конструкции, что описана выше. Опыт с импульсной дефлаграцией был проведен с ГИДС, в которой одну секцию горелочного тракта с препятствиями-турбулизаторами заменили на секцию без препятствий. В ГИДС такой конфигурации переход горения в детонацию не наблюдался ни в одном цикле, а средняя скорость волны дефлаграции в конце горелочного тракта была на уровне 900–1000 м/с. Из рис. 3, б следует, что скорости нагрева тепловой мишени продуктами импульсной детонации и дефлаграции приблизительно постоянны и равны 1,1 и 0,7 К/с соответственно. Отметим, что эти опыты были чисто демонстрационными: задача о повышении теплоотбора от продуктов детонации и дефлаграции не решалась. Тем не менее, такое сравнение показывает, что нагрев тепловой мишени импульсной детонацией более эффективен.

Таким образом, были измерены стационарные температуры элементов конструкции ГИДС, работающей на смеси природного газа с воздухом, при долговременных испытаниях опытного образца в импульсно-детонационном режиме с частотой 2 Гц без принудительного охлаждения. Знание стационарных температур требуется для разработки энергоэффективной системы принудительного охлаждения ГИДС. Опыты показали, что максимальное значение стационарной температуры (~ 500 °С) достигается приблизительно через 200 с работы ГИДС у внутренних элементов — препятствий-турбулизаторов, расположенных в той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна детонации. Стенки ГИДС в этой части горелочного тракта нагреваются до ~ 420 °С за время порядка 1000 с. В той части горелочного тракта, через которую циклически «пробегают» волна дефлаграции, стенки ГИДС и внутренние элементы нагреваются до стационарной температуры, не превышающей ~ 330 °С. Полученные ре-

зультаты показывают, что принудительное охлаждение ГИДС, вообще говоря, требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически «пробегают» волна детонации.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.526.12.6018 «Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок».

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Скрипник А. А., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства на природном газе // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. Вып. 4. С. 101–107.
2. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Фролов Ф. С. Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 77–80.
3. Фролов С. М. Детонационные горелочные устройства: физические принципы и перспективы применения в энергетике // XIV Минский Междунар. форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов и сообщений. — Минск: Изд-во ИТМО, 2012. Т. 1. Ч. 1. С. 22–24.
4. Фролов С. М. Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок // Энергосбережение и эффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии: Тезисы докл. Всеросс. молодежной научно-технич. конф. — М.: АНО «ЦЭРТ», 2012. С. 18–19.
5. Фролов С. М., Фролов Ф. С., Аксенов В. С., Иванов В. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Авдеев К. А. Импульсно-детонационное горелочное устройство на природном газе // Забабахинские научные чтения: Сб. мат-лов XI Междунар. конф. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012. С. 113.
6. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.