

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕЛОЧНОГО
УСТРОЙСТВА НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

**В. А. Сметанюк^{1,2}, С. М. Фролов^{1,2,3}, К. А. Авдеев^{1,2},
В. С. Аксенов^{1,2,3}, П. А. Гусев^{1,2}, В. С. Иванов^{1,2}, А. С. Коваль^{1,2},
С. Н. Медведев^{1,2}, Ф. С. Фролов^{1,2}, И. О. Шамшин^{1,2,3}**

¹Центр ИДГ
г. Москва, Россия
²ИХФ РАН
г. Москва, Россия
³НИЯУ МИФИ
г. Москва, Россия

В 2011–2013 гг. в рамках Госконтракта с Минобрнауки РФ в Центре ИДГ – ИХФ РАН проводились 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 с воздухом [1]. Горелка предназначена для применения в нагревательных печах металлургической, металлопрокатной и других отраслях промышленности, а также в различных теплоэнергетических установках.

К основным требованиям, предъявляемым к ГИДС, относились мощность, массогабаритные ограничения, уникальные характеристики струи продуктов детонации, а также снижение расхода природного газа и выхода вредных веществ по сравнению с существующими недетонационными аналогами. Несмотря на то что вопросы о шуме и вибрациях при работе ГИДС выходили за рамки Госконтракта, решение этих вопросов во многом определяет области применения новой технологии. От уровня шума и вибраций зависят не только стоимость вспомогательного оборудования и организации рабочих мест, но и надежность систем и элементов ГИДС.

Уровень шума (звукового давления) L (в дБ) определяется по стандартной формуле:

$$L = 20 \lg \frac{P}{20 [\text{мкПа}]}, \quad (1)$$

где P — давление в акустической волне (Па). По (1) давление в акустической волне амплитудой 20 Па соответствует шуму в 120 дБ. Отметим, что

допустимые уровни шума на рабочих местах, а также общие требования к шумовым характеристикам машин и механизмов определяются нормативным документом [2]. Согласно [2] на рабочих местах уровень непостоянного шума не должен превышать 110 дБ, а максимальный уровень импульсного шума не должен превышать 125 дБ.

В литературе имеется несколько работ по теоретическому (см., например, [3]) и экспериментальному (см., например, [4]) исследованию шумовых характеристик свободных выхлопных струй импульсно-детонационных устройств. В [3] расчетным путем показано, что для одиночного детонационного импульса максимальная интенсивность шума в открытом выходном сечении плоского канала шириной 0,2 м, заполненного кислородной смесью метана или водорода, достигает 202 дБ; на расстоянии 1 м от выходного сечения канала вдоль плоскости симметрии — 173 дБ; а на расстоянии 0,4 м от выходного сечения канала по нормали к плоскости симметрии — 174 дБ. В [4] измерен уровень шума при стендовых испытаниях воздушно-реактивного импульсно-детонационного двигателя, работающего на бензиновоздушной смеси с частотой до 25 Гц. Оказалось, что на расстоянии 1 м от открытого выходного сечения детонационной трубы максимальная интенсивность шума достигала 172–173 дБ, что очень близко к оценкам [3].

Поскольку выхлопные струи ГИДС планируется использовать для скоростного нагрева заготовок в замкнутых рабочих емкостях (печах и др.), важно знать не столько шумовые характеристики свободных выхлопных струй, сколько шумовые характеристики детонационных импульсов снаружи рабочих емкостей. Цель данной работы — измерение уровня шума в помещении, в котором расположена ГИДС, и в окрестности этого помещения при огневых испытаниях опытного образца ГИДС в импульсно-детонационном режиме с частотой от 1 до 4 Гц, а также исследование эффективности использованного способа шумопоглощения.

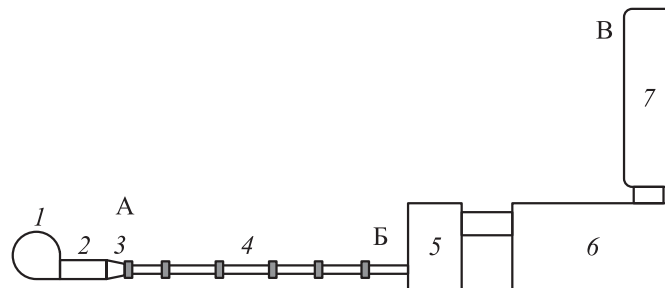


Рис. 1 Схема ГИДС и присоединенных к ней емкостей: 1 — воздуходувка; 2 — воздуховод; 3 — СЗУ; 4 — горелочный тракт; 5 — термошкаф (печь); 6 — глушитель; 7 — вытяжной колодец. Буквами А, Б и В обозначены точки измерения шумовых характеристик

Опытный образец ГИДС с максимальной тепловой мощностью 2 МВт расположен в подземном помещении и состоит из двух сопряженных секций (рис. 1) — смесительно-зажигающего устройства (СЗУ) с отдельной подачей природного газа и воздуха и с источником зажигания (несколько стандартных автомобильных свеч) и горелочного тракта — трубы диаметром 150 мм и длиной 5,5 м с препятствиями-турбулизаторами, установленными внутри трубы и обеспечивающими быстрый переход горения в детонацию (ПД) в стехиометрической смеси природного газа с воздухом. Более детальное описание ГИДС представлено в [1].

Открытый конец горелочного тракта ГИДС присоединен с помощью фланца к специальному бронированному и теплоизолированному полузамкнутому помещению объемом 2 м³ — термощкафу. В термощкафу напротив открытого конца горелочного тракта располагается тепловая мишень. Система термощкаф–тепловая мишень служит для моделирования условий в термической печи. Тепловая мишень подвергается импульсному тепловому и динамическому воздействию ударных волн и струй продуктов детонации. Термощкаф экранирует рабочее помещение от этих воздействий.

Из термощкафа через перепускной канал с площадью сечения ~ 1 м² продукты детонации сначала поступают в глушитель — емкость 6 на рис. 1 — с глубокой песочной засыпкой на полу (~ 50 см) и с толстым слоем (~ 30 см) крупногранулированного (~ 3 см) керамзита, закрепленного вдоль стен с помощью мелкоячеистой металлической сетки, а затем через другой перепускной канал — в вертикальный глушитель-колодец 7 (см. рис. 1) диаметром 1 м и высотой 6 м, в котором размещаются акустические поглотители специальной конструкции. Выходное сечение глушителя-колодца обваловано мешками с керамзитом и сообщается с атмосферой.

Шумовые характеристики ГИДС измерялись в трех точках, отмеченных на рис. 1: в точке А (возле СЗУ), в точке Б (возле термощкафа) и в точке В (возле выходного сечения глушителя-колодца). Минимальное значение собственной частоты акустических колебаний в помещении, в котором расположена ГИДС, а также в емкостях 5, 6 и 7 (см. рис. 1), присоединенных к ГИДС, составляет около 100 Гц, что значительно выше рабочей частоты ГИДС (до 5 Гц). В связи с этим при измерениях максимального уровня шума в помещении, где расположена ГИДС (точки А и Б на рис. 1), а также в окрестности выходного сечения глушителя-колодца (точка В на рис. 1) в открытом пространстве над поверхностью земли эффектами эха, приводящими к резонансным явлениям, можно пренебречь.

Для измерения уровня шума применяли несколько устройств и приборов:

- (1) тензорезистивный датчик давления «ЗОНД-10 (1165м)»;
- (2) микрофон;
- (3) шумомер «Алгоритм 03» (класс 1);
- (4) шумомер «SL-401» (класс 3).

При использовании микрофона его сигнал калибровали с помощью звука известной амплитуды. Следует отметить, что величина акустического шума, выраженного в децибелах, зависит от выбора временного интервала, на котором определяется средний уровень амплитуды акустических возмущений. Стандартом [5] принято три временных промежутка для осреднения: 1000 мс для медленно изменяющихся акустических возмущений, а также 125 мс для быстро изменяющихся и 35 мс для кратковременных импульсных сигналов. Другой фактор — чувствительность слухового аппарата человека к звуковым волнам различной частоты. Для учета этого фактора в шумомерах используют различные частотные фильтры.

Огневые испытания ГИДС проводили по алгоритмам, введенным в цифровой контроллер. Приведем пример такого алгоритма. Сначала запускалась воздуходувка, затем в СЗУ подавалась порция природного газа и с некоторой задержкой зажигалась образованная топливно-воздушная смесь, после чего в горелочном тракте ГИДС происходил быстрый ПГД. Далее в СЗУ подавалась следующая порция природного газа, так что частота генерации детонационных волн составляла 1 Гц. После работы с такой частотой в течение некоторого заданного промежутка времени ГИДС автоматически переходила к работе с частотой 2 Гц, а затем и 4 Гц. Далее частота работы ГИДС ступенчато уменьшалась до 2 и 1 Гц, а затем подача природного газа в СЗУ прекращалась, и испытание заканчивалось. В процессе испытаний регистрировались изменения давления в паскалях и шума в децибелах, причем временной промежуток для осреднения сигнала в шумомерах принимался равным 35 мс, а в качестве корректирующего фильтра выбирался фильтр типа А [5]. Измерения разными устройствами и приборами в целом соответствовали друг другу.

В качестве примера на рис. 2 приведены временные зависимости уровня шума, измеренного шумомером «Алгоритм 03» в точках А, Б и В соответственно. Цифрами отмечены характерные участки кривых: 1 — фоновый шум; 2 — шум при работе воздуходувки ГИДС; 3 — шум при работе ГИДС с частотой 1 Гц; 4 — шум при работе ГИДС с частотой 2 Гц; 5 — шум при работе ГИДС с частотой 4 Гц. Видно, что качественный характер кривых одинаков во всех точках измерения шумовых характеристик. Максимальная интенсивность шума в точках А и Б приблизительно одинакова и составляет 150 дБ независимо от рабочей частоты ГИДС, а в точке В, расположенной в окрестности выходного сечения глушителя-коллодца, она снижается до 105 дБ. Последнее означает, что использованный авторами способ шумопоглощения вполне эффективен и обеспечивает уровень шума, допустимый стандартом [2].

Таким образом, измерены уровни шума в помещении, в котором расположена ГИДС, и в окрестности этого помещения при огневых испытаниях опытного образца ГИДС в импульсно-детонационном режиме с частотой от 1 до 4 Гц, а также доказана эффективность использованного способа шумо-

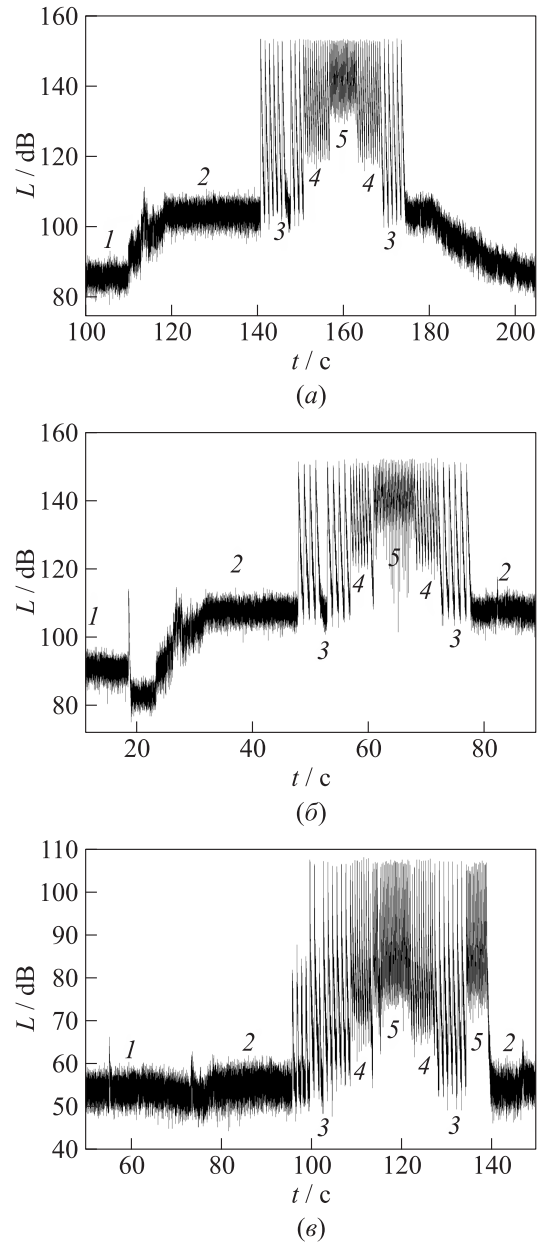


Рис. 2 Уровни шума, измеренные шумомером в точке А возле СЗУ (а), в точке Б возле термошкафа (б) и в точке В возле выходного сечения глушителя-колодца (в)

поглощения. Максимальная интенсивность шума в помещении составила 150 дБ и не зависела от рабочей частоты ГИДС. В точке, расположенной в окрестности выходного сечения глушителя-колодца, максимальная интенсивность шума не превышала 105 дБ.

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Авдеев К. А., Борисов А. А., Иванов В. С., Коваль А. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Циклический переход горения в детонацию в проточной камере сгорания импульсно-детонационного горелочного устройства // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 3. С. 39–43.
2. Шум: общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.003-83 (СТ СЭВ 1930-79).
3. He, X., and A. R. Karagozian. 2003. Numerical simulation of pulse detonation engine phenomena. *J. Sci. Comput.* 19(1-3):201–224.
4. Xi, Zh. L., L. Na, and Y. C. Jun. 2009. Investigation on noise radiation characteristics of two-phase multi-cycle pulse detonation engine. AIAA Paper No. 2009-297.
5. Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний. ГОСТ 17187-81.

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
И ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО
ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ
СВЕРХЗВУКОВОГО ПОЛЕТА

А. Э. Зангиев^{1,2,3}, В. С. Иванов^{1,2}, С. М. Фролов^{1,2,3}

¹ Центр ИДГ
г. Москва, Россия
²ИХФ РАН
г. Москва, Россия
³НИЯУ МИФИ
г. Москва, Россия

В [1] проведены расчеты основных тяговых характеристик — удельного импульса, удельного расхода топлива, удельной тяги и коэффициента тяги — воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя (ИДД) в компоновке с входным устройством и соплом в условиях сверхзвукового полета с числом Маха 3 на разных высотах (от 8 до 28 км над уровнем моря) с учетом внешнего обтекания двигателя, физико-химических особенностей окисления и горения углеводородного горючего (пропана), а также конечного времени ускорения турбулентного пламени и перехода горения в детонацию (ПГД) в камере сгорания. При этом рабочий процесс в ИДД моделировали численно в двумерном (2D) осесимметричном приближении. Ввиду того, что в [1] сделан важный вывод о превосходстве ИДД по удельной тяге более чем на 20% над идеальным прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) на обычном горении, этот вывод следовало проверить путем решения трехмерной (3D) задачи в той же постановке при тех же значениях определяющих параметров. Цель данного сообщения — сравнение расчетных тяговых характеристик ИДД, полученных с помощью 3D и 2D расчетов.

Рассматривали ИДД общей длиной 2,12 м и внешним диаметром 83 мм, включающий входное устройство, ресивер, кольцевой обводной канал и камеру сгорания, оборудованную механическим клапаном, регулярными кольцевыми препятствиями-турбулизаторами (9 шт.) и суживающе-расширяющимся соплом (в [1] такая конфигурация двигателя названа базовой). Как и в [1], математическая модель течения, положенная в основу расчетов, — осредненные по Рейнольдсу уравнения сохранения массы, количества дви-