

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЙ СКОРОСТНОЙ ГОРЕЛКИ

© 2013 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов, П. А. Гусев, В. С. Иванов,
А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк, Ф. С. Фролов, И. О. Шамшин

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

Центр импульсно-детонационного горения, Москва

**E-mail: smfrol@chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 29.05.2013

Измерены стационарные температуры элементов конструкции горелки импульсно-детонационной скоростной (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°C) 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°C 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°C. Полученные результаты показывают, что принудительное охлаждение ГИДС, вообще говоря, требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически “пробегают” волна детонации.

Ключевые слова: импульсно-детонационное горелочное устройство, природный газ, тепловой режим.

DOI: 10.7868/S0207401X13120029

ВВЕДЕНИЕ

В течение 2010–2013 гг. в Центре импульсно-детонационного горения при 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 [1–7]. 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°C;

– 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 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 опусто-



Рис. 1. Схема опытного образца ГИДС и точки установки термопар (см. текст).

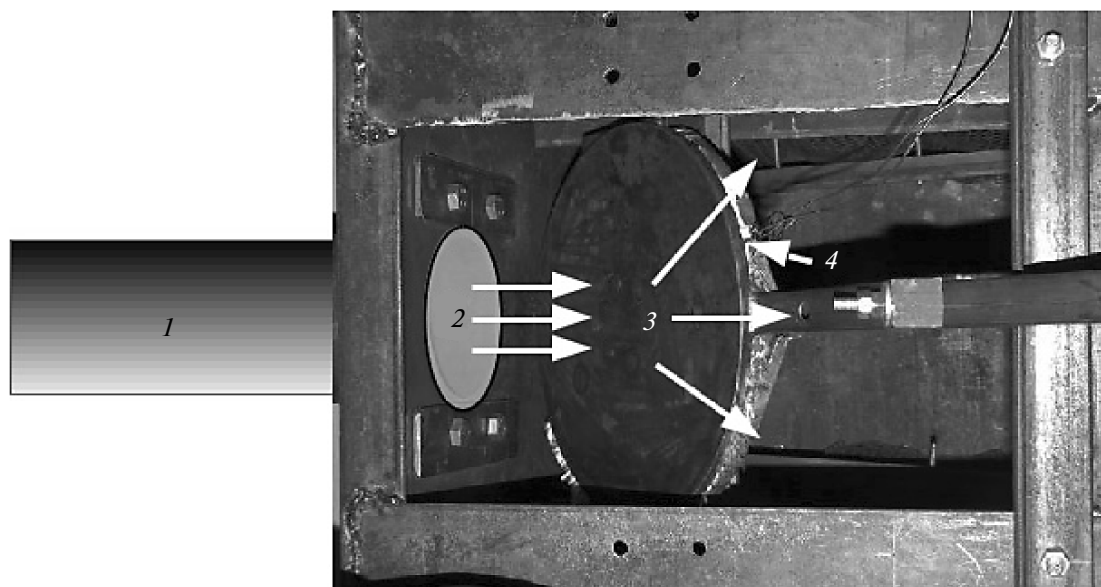


Рис. 2. Фотография тепловой мишени, установленной в шумопоглощающем блоке: 1 – выходная секция горелочного тракта ГИДС, 2 – выходное сечение ГИДС, 3 – тепловая мишень, 4 – термопары.

шением 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.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

На рис. 1 показана схема опытного образца ГИДС с указанием точек установки термопар 1–6 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); смешительно-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 [8]; и 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° . Тепловая мишень была снабжена двумя термопарами и монтировалась в шумопоглощающем блоке (рис. 2). Продолжительность экспериментов при работе ГИДС с частотой детонационных импульсов в 2 Пц 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. На рис. 3 представлена фотография одной из



Рис. 3. Фотография одной из секций горелочного тракта: 1 – датчик давления, 2 – ионизационный зонд, 3 – терморезистор, 4 – термопара.

секций горелочного тракта с установленными в ней двумя датчиками давления 1, ионизационным зондом 2, терморезистором 3 и термопарой 4. Во всех рабочих циклах ГИДС скорость фронта реакции на расстоянии более 4.0 м от СЗУ превышала 1600–1700 м/с, что соответствует скорости детонации в стехиометрической метановоздушной смеси вблизи предела распространения. В окрестности тех сечений горелочного тракта ГИДС, где происходил переход горения в детонацию (ПГД), регистрировались скорости фронта реакции, превышающие 2000 м/с. Это согласуется с общеизвестным фактом, что при ПГД детона-

ция возникает через режим пересжатой детонации. По окончании эксперимента дополнительно проводились контрольные измерения температуры разных участков ГИДС и тепловой мишени при помощи тепловизора фирмы “TESTO”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 4а представлены измеренные зависимости температуры внешних стенок разных элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы, составившей 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. 4а) имели разную температуру. По истечении времени с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме (300 с) подачу топлива в СЗУ прекращали, и охлаждали элементы ГИДС высокоскоростным потоком воздуха, непрерывно подаваемым в СЗУ. Поэтому все температурные кривые на рис. 4а имеют максимум, причем этот максимум достигается при $t > 300$ с вследствие инерционности тепловых процессов и за счет теплообмена с внешней средой.

Из рис. 4а видно, что температурные кривые для разных элементов ГИДС существенно отличаются друг от друга. За время опыта температуры приведенных на рис. 1 элементов СЗУ 1 и 2 (кривые 1 и 2 на рис. 4а) практически достигают ста-

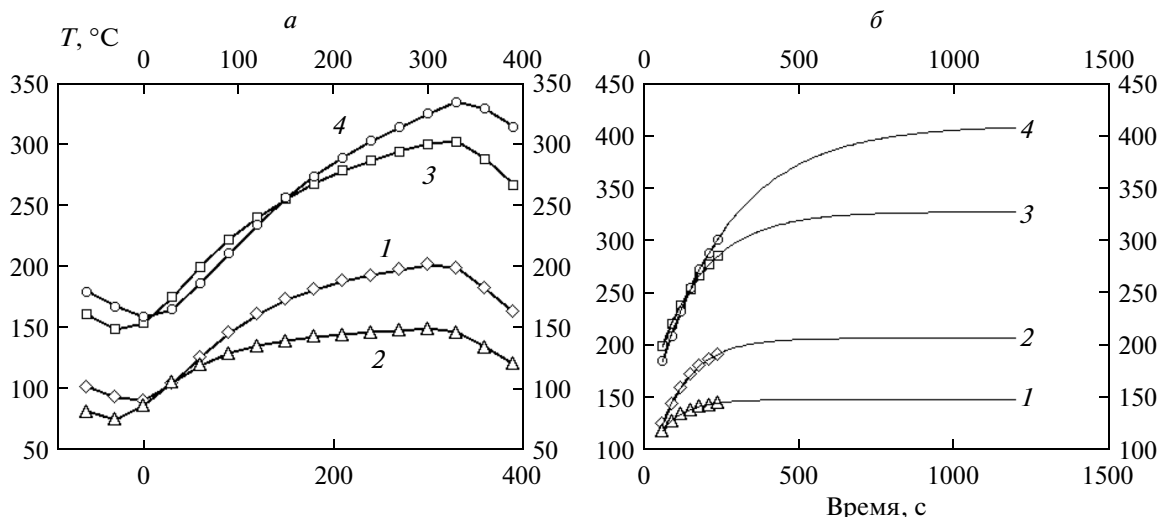


Рис. 4. Измеренные зависимости температуры внешних элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы, составившей 300 с (а), и экстраполяция этих зависимостей на большую продолжительность работы – до 1200 с (б): 1 – внешняя стенка СЗУ (позиция 1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

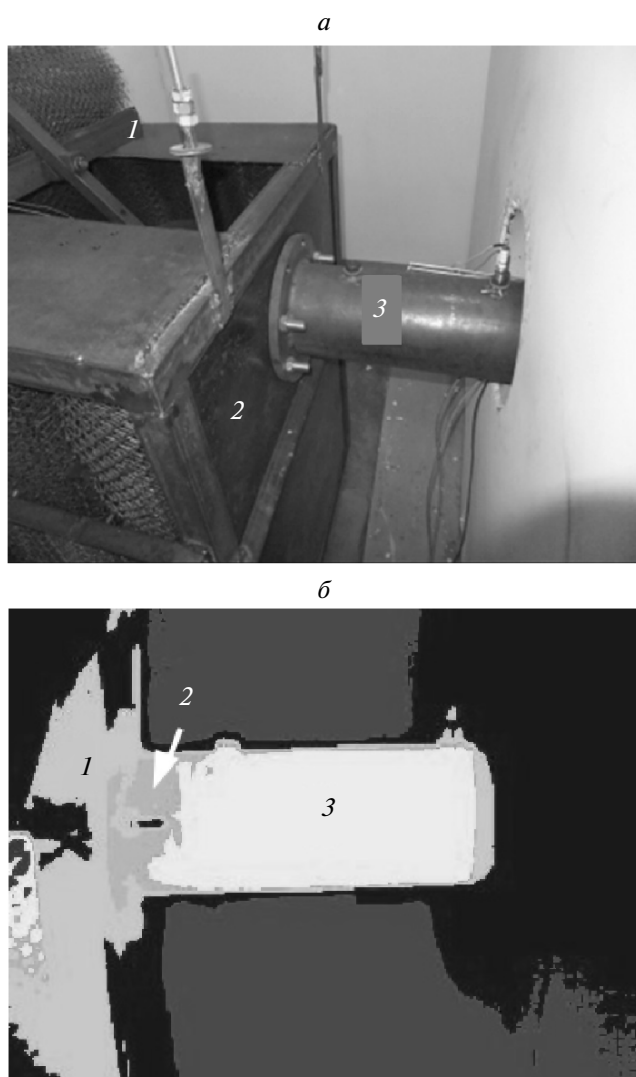


Рис. 5. Фотография выходной секции горелочного тракта, присоединенной к шумопоглощающему блоку (а), и пример термограммы этой секции через 60 с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме (б). Цифрами отмечены температурные зоны: 1 – 50°С, 2 – 100°С, 3 – 180°С.

ционарных значений в 150 и 200°С соответственно. Что касается элементов 4 и 6 горелочного тракта (кривые 3 и 4 на рис. 4а), то их температурные кривые за время опыта не успевают выйти на стационарный уровень. Чтобы оценить стационарную температуру этих элементов, мы экстраполировали экспериментальные данные на большую продолжительность работы ГИДС (до 1200 с), используя экспоненциальные функции. Оправданность такой экстраполяции проверена на результатах работы [9], в которой проведено экспериментальное исследование и численное моделирование теплового состояния детонационной трубы с циклическим ПГД в водородовоздушной смеси. Характерные размеры экспериментальной установки

в [9] были относительно малы (труба диаметром 40 мм и длиной 500 мм), а частота детонационных импульсов – относительно велика (60 Гц). Поэтому стационарный тепловой режим достигается за относительно короткое время. При обработке результатов [9] оказалось, что экспоненциальная экстраполяция экспериментальных данных дает погрешность температуры, не превышающую 10%.

Результаты экстраполяции экспериментальных данных для температуры элементов 4 и 6 (см. рис. 1) горелочного тракта ГИДС представлены на рис. 4б. Из рис. 4б следует, что элементы 4 и 6 (кривые 3 и 4) могут прогреться до 330 и 420°С соответственно. Отметим, что элемент 4 расположен в той части горелочного тракта, через которую циклически “пробегают” 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 расположен в той части горелочного тракта, через которую циклически “пробегают” 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.

На рис. 5 представлена фотография выходной секции горелочного тракта с элементом 6 (рис. 5а) и пример термограммы этой секции (рис. 5б) через 60 с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме. Температурные измерения, сделанные с помощью тепловизора и термопар, хорошо согласуются друг с другом.

Кроме измерения температуры внешних стенок ГИДС нами 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. 6а и б соответственно.

Из рис. 6а видно, что в отличие от внешних стенок горелочного тракта ГИДС внутренние элементы 3 и 5 достигают стационарной температуры в 300 и 500°С значительно быстрее: через 100 и 200 с работы ГИДС в импульсно-детонационном режиме соответственно. Тот факт, что внутренние элементы ГИДС прогреваются до указанных температур, косвенно подтверждает допустимость и справедливость результатов экстраполяции температурных кривых на рис. 4б. 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 и камер сгорания могут в течение длительного времени вы-

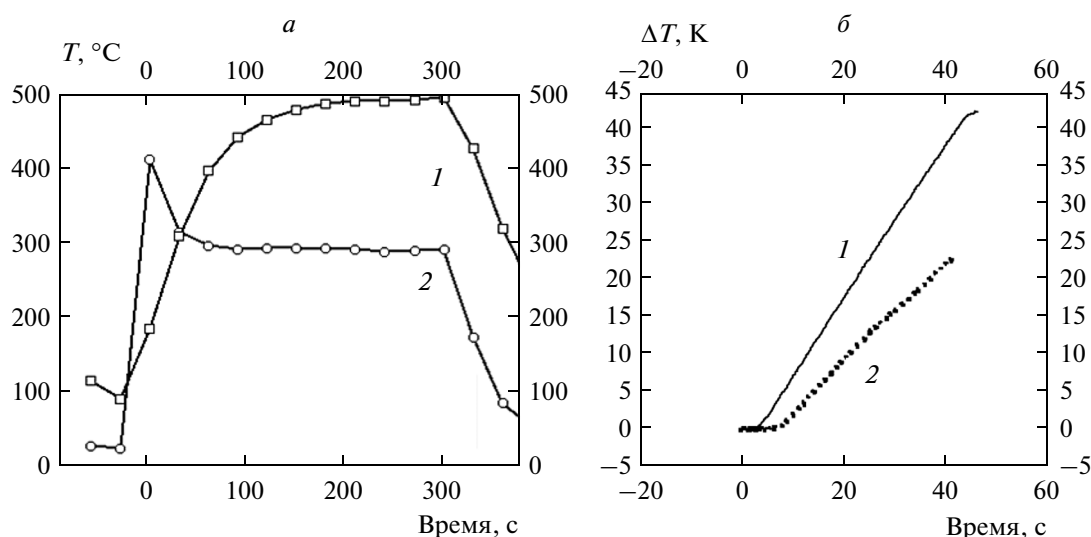


Рис. 6. *a* – Измеренные зависимости температуры внутренних элементов конструкции ГИДС от времени в опыте с продолжительностью импульсно-детонационного режима работы, составившей 300 с: 1 – препятствие-турбулизатор (позиция 3 на рис. 1), 2 – препятствие-турбулизатор (позиция 5 на рис. 1); *б* – температурные кривые при нагреве тепловой мишени продуктами импульсной детонации (кривая 1) и импульсной дефлаграции (кривая 2).

держивать температуры до $\sim 400^{\circ}\text{C}$ без принудительного охлаждения. Температура в 500°C для практического устройства представляется чрезмерно высокой не столько в связи с проблемой температурной стойкости металла, сколько в связи с тем, что при такой температуре поступающая в ГИДС смесь природного газа с воздухом может самовоспламениться с короткими периодами индукции. Следовательно, для внутренних элементов ГИДС должно быть предусмотрено принудительное охлаждение. Из рис. 6*a* следует, что такое охлаждение требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически “пробегает” волна детонации.

На рис. 6*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 частичным 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 ПГД не наблюдался ни в одном цикле, а средняя скорость волн дефлаграции в конце горелочного тракта была на уровне 900–1000 м/с. Из рис. 6*б* следует, что скорости нагрева тепловой мишени продуктами импульсной детонации и дефлаграции приблизительно постой-

яны и равны 1.1 и 0.7 К/с соответственно. Отметим, что эти опыты были чисто демонстрационными: задача о повышении теплоотбора у продуктов детонации и дефлаграции не решалась. Тем не менее такое сравнение показывает, что нагрев тепловой мишени импульсной детонацией более эффективен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами 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 ($\sim 500^{\circ}\text{C}$) достигается приблизительно через 200 с работы ГИДС у внутренних элементов – препятствий-турбулизаторов, расположенных в той части горелочного тракта, через которую циклически “пробегает” волна детонации. Стенки ГИДС в этой части горелочного тракта нагреваются до $\sim 420^{\circ}\text{C}$ за время порядка 1000 с. В той части горелочного тракта, через которую циклически “пробегает” волна дефлаграции, стенки ГИДС и внутренние элементы нагреваются до стационарной температуры, не превышающей $\sim 330^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты показывают, что принудительное охлаждение ГИДС, вообще говоря, требуется только на тех участках горелочного тракта, через которые циклически “пробегает” волна детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта № 16.526.12.6018 “Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и тепло-энергетических установок”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. и др.* // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2011. Вып. 4. С. 101.
2. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Иванов В.С. и др.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 7. С. 77.
3. *Фролов С.М.* // XIV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Тез. докл. и сообщ. Т. 1. Ч. 1. Минск: Изд-во ИТМО, 2012. С. 22.
4. *Фролов С.М.* // Тез. докл. Всерос. молодежной науч.-техн. конф. М.: АНО “ЦЭРТ”, 2012. С. 18.
5. *Фролов С.М., Фролов Ф.С., Аксенов В.С. и др.* // Забавинские научные чтения. Сб. матер. XI Междунар. конф. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012. С. 113.
6. *Фролов С.М.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31.
7. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Авдеев К.А., Борисов А.А. и др.* // Докл. АН. 2013. Т. 449. № 6.
8. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Авдеев К.А., Борисов А.А. и др.* // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 3. С. 39.
9. *Tan X.-M., Zhang J.-Z., Wang X.-T.* // Engin. Appl. Comput. Fluid Mechan. 2011. V. 5. №. 4. P. 499.