

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 541.124

ДЕТОНАЦИОННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ

© 2021 г. И. Е. Забелинский¹, П. В. Козлов¹, Ю. В. Акимов¹, Н. Г. Быкова¹,
Г. Я. Герасимов¹, Ю. В. Туник¹, В. Ю. Левашов^{1*}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vyl69@mail.ru, levashovvy@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.02.2021;

после доработки 02.03.2021;

принята в печать 22.03.2021

Приведено описание модернизированной двухдиафрагменной ударной трубы DDST-M с детонационным инициированием сильных ударных волн для условий, моделирующих вход космических аппаратов в атмосферу Земли со второй космической скоростью. Результат достигается за счет оптимизации процесса горения водородно-кислородной смеси в камере высокого давления путем установки специального перфорированного диска у торцевой стенки камеры. Инжекция горячих струй газа через отверстия диска обеспечивает быстрое формирование турбулентного пламени и лидирующей ударной волны, отражение которой от диафрагмы обеспечивает сжигание газа в энергетически эффективном режиме детонации Чепмена–Жуге. Измерены интенсивности излучения ударно-нагретого воздуха в ультрафиолетовой и видимой областях спектра при скорости ударной волны 11.4 км/с и начальном давлении газа перед ударной волной 33.25 Па.

Ключевые слова: ударные волны, детонационная ударная труба, вторая космическая скорость, излучение.

DOI: 10.31857/S0207401X2111011X

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее освоение космического пространства предполагает создание новых космических аппаратов (КА), которые входят в атмосферу Земли с орбитальной и сверхорбитальной скоростями. Одна из ключевых проблем связана с обеспечением надежной термической защиты КА. Решение этой проблемы требует усовершенствования как численных, так и экспериментальных подходов к исследованию тепловых потоков за высокоскоростными ударными волнами. Известно, что значительная доля теплового потока у поверхности спускаемых КА приходится на излучение [1]. Значительный объем данных по излучению ударно-нагретых газов получен экспериментально в ударных трубах [2]. Эти данные используются не только для оценки тепловых потоков у поверхности спускаемых КА, но и для верификации газодинамических моделей обтекания КА в атмосфере Земли и других планет [3].

В настоящее время в мировой практике работает большое количество установок с ударными трубами, отличающихся друг от друга размерами, конструкцией и целью проводимых исследований [4–7]. Ударные трубы можно разделить по способу нагрева толкающего газа в камере высо-

кого давления (КВД) [8]. В электроразрядных ударных трубах толкающий газ в КВД нагревается до очень высоких температур (около 20000 К для гелия) за счет импульсного электродугового разряда. Этот метод нагрева, в частности, используется на установке EAST (Electric Arc Shock Tube), эксплуатируемой в Исследовательском центре NASA Ames. В этой установке скорость ударной волны (УВ) может превышать 18 км/с [4]. Эта установка способна моделировать газовую среду с очень высокой энтальпией. В работах [9–11] представлены многочисленные результаты выполненных в EAST исследований по измерению спектров излучения ударно-нагретых газов применительно к условиям входа КА в атмосферу Земли и других планет с орбитальной и сверхорбитальной скоростями. В исследовательском центре CUBRC (Буффало, США) функционируют четыре ударных туннеля LENS (Large Energy National Shock Tube) с электрически нагреваемой КВД [12]. В них изучается обтекание тел различной конфигурации, а также измеряются спектры излучения ударно-нагретых газов. С вводом в эксплуатацию нового крупномасштабного расширительного туннеля LENS XX [13] исследовательский центр CUBRC получил возможность прово-

дить испытания в любом сверхзвуковом или гиперзвуковом режиме, представляющем практический интерес. В России аналогичная установка ADST (Arc Driven Shock Tube) позволяет исследовать радиационные и ионизационные характеристики различных газовых смесей при скорости УВ до 10 км/с [14–16].

В настоящее время широко используются поршневые ударные установки, в которых нагрев толкающего газа осуществляется при его адиабатическом сжатии до давлений в несколько сотен МПа с помощью тяжелого свободного поршня [4]. В качестве толкающего газа обычно используется гелий, который иногда смешивается с небольшим количеством аргона. К таким установкам в первую очередь относится серия ударных туннелей X1, X2 и X3 Университета Квинсленда (Австралия), которые в расширительном режиме способны генерировать ударную волну, имеющую скорость до 11 км/с [17]. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) эксплуатирует в настоящее время ударную трубу HVST (Hyper Velocity Shock Tube) с двойной диафрагмой и свободным поршнем, исследуя термохимические неравновесные явления и, в частности, излучение, испускаемое из сильно нагретой области за ударной волной [18]. Из более поздних ударных установок следует отметить ударный туннель T6 Stalker, который является совместной разработкой Оксфордского университета и Центра гиперзвуковых исследований Университета Квинсленда [19]. Установка способна работать как туннель с отраженной УВ для тестирования моделей спускаемых аппаратов, а также в режиме работы ударной трубы для исследования излучения ударно-нагретого газа при скоростях УВ до 18 км/с. В настоящее время в Высшем техническом институте Лиссабона (IST) при финансовой поддержке Европейским космическим агентством (ESA) введена в эксплуатацию новая кинетическая ударная труба ESTHER (European Shock Tube for High Enthalpy Research), способная генерировать ударные волны со скоростями до 18 км/с [20]. Самым большим в мире ударным туннелем в настоящее время является высокоэнthalпийная установка FD-21FPST с двухметровым диаметром тестового участка и общей длиной более 110 м, построенная в Китайской академии аэрокосмической аэродинамики (CAAA) [21].

Еще один способ инициирования сильных ударных волн заключается в добавлении некоторого количества водородно-кислородной смеси в толкающий газ, что позволяет использовать теплоту горения для резкого повышения давления в КВД. Примерами подобных установок служат ударный туннель NASA HYPULSE (ATK GASL, США) [22, 23], ударный туннель TH2 (Аахен, Германия) [24], а также китайские ударные установки JF16 [25] и JFX [26]. В России наибольший объем информации по радиационным характеристикам

ударно-нагретых газов получен в ударных трубах МФТИ [27, 28] и НИИ механики МГУ [29–32]. Сильные ударные волны с высокой излучательной способностью также могут быть получены при взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества в канале [33].

Установки с горением в КВД намного дешевле поршневых и электроразрядных, поскольку в них нет сложных механических и электроразрядных устройств. Однако на существующих установках подобного типа до настоящего времени не удавалось получить скорость ударной волны выше 7–8 км/с. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты и описание модернизированной двухдиафрагменной ударной трубы DDST-M, в которой за счет оптимального сжигания газа в КВД удается получить ударную волну, распространяющуюся в воздухе со скоростью 11.4 км/с при начальном давлении 33.25 Па.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Модernизированная ударная труба DDST-M имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром 50 мм. Модернизация исходной двухдиафрагменной ударной трубы (DDST) заключается во включении в конструкцию трубы дополнительного элемента – форкамеры. Форкамера отделена от торцевой стенки трубы, на которой расположено поджигающее устройство, от основного объема КВД перфорированным диском. Последний находится в 20 мм от торцевой стенки и имеет 19 сопловых микроотверстий с входным диаметром, равным 1 мм, и выходным диаметром – 2 мм. Для поджигания горючей смеси в форкамере используется свеча зажигания с энергией разряда 100 мДж.

Инициирование ударной волны осуществляется за счет детонационного сжигания в КВД стехиометрической смеси кислорода с водородом, разбавленной гелием; при этом концентрация гремучей смеси составляет 50%. После разрыва диафрагмы, отделяющей КВД от КНД, по последней распространяется сильная ударная волна. Для уменьшения влияния потока толкающего газа на закручивание и унос лепестков диафрагмы диафрагменный узел выполнен в виде расходящегося и сходящегося конусов, между которыми расположена диафрагма, поэтому при ее раскрытии лепестки отклоняются на угол, меньший 90° . Скорость ударной волны измеряется при помощи пьезоэлектрических датчиков, смонтированных в стенке измерительной секции трубы на расстоянии 50 мм друг от друга. Медная диафрагма, отделяющая КВД от КНД, имеет толщину 0.5 мм. На диафрагме сделаны насечки глубиной в 0.35 мм. В КВД установлены датчики давления, сигнал с которых записывается на компьютер с помощью АЦП L-20-10. На рис. 1 представлена схема КВД с расположением в ней

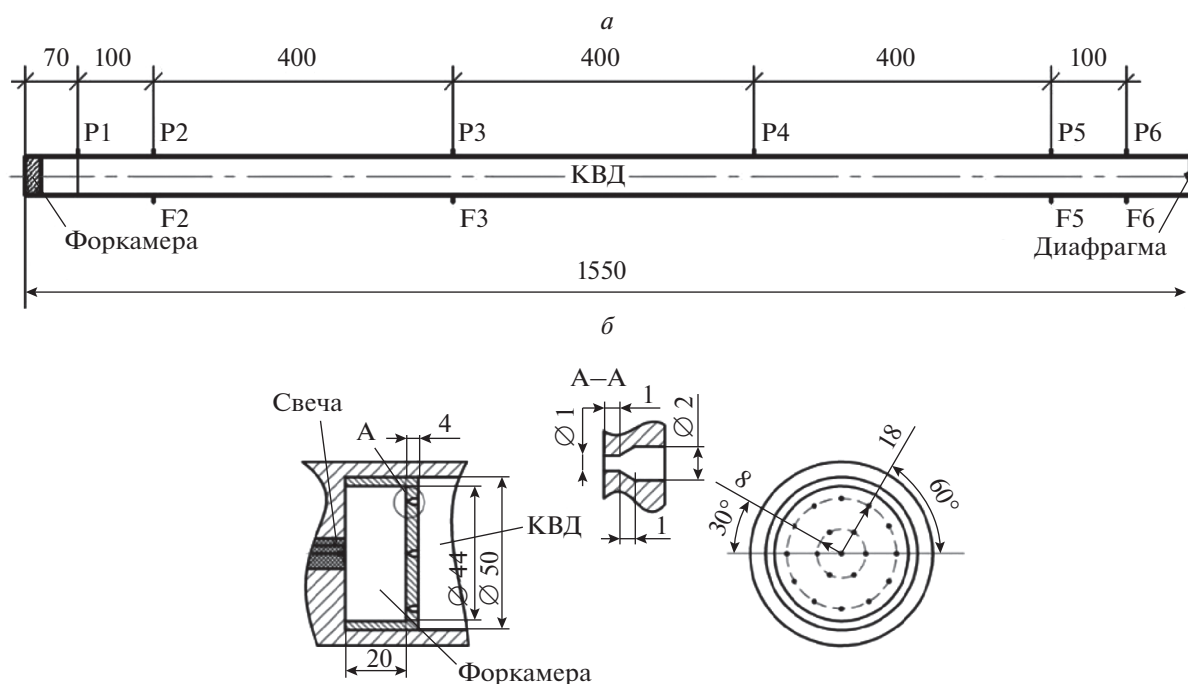


Рис. 1. Схема камеры высокого давления (а), форкамеры и перфорированного диска (б); P1–P6 – датчики давления; F2, F3, F5, F6 – датчики, регистрирующие излучение; размеры указаны в мм.

датчиков, а также схема форкамеры и перфорированного диска.

Следует отметить, что перфорированная перегородка является эффективным средством для инициирования детонации или быстрых режимов горения в других устройствах, в которых необходим быстрый переход горения в детонацию [34, 35]. К таким устройствам, в частности, можно отнести импульсные детонационные двигатели и установки детонационного сжигания продуктов пиролиза [36].

Ударная труба DDST-M оборудована двумя измерительными секциями, что позволяет в одном эксперименте определять временное и спектральное распределения излучения газа за фронтом ударной волны. Первая измерительная секция регистрирует временную эволюцию излучения одновременно двумя спектрографами: С-300 и V&M50. Вторая секция измеряет интегральную по времени плотность излучения газа (панорамный спектр) в ультрафиолетовом (УФ) и видимом (ВД) спектральных диапазонах. Система регистрации УФ-излучения ($\lambda = 190\text{--}670$ нм) собрана на базе спектрографа Horiba SP140-1824. Эта система фиксирует интегральное распределение спектральной яркости на линейном ПЗС-детекторе¹⁾ Hamamatsu S11156 при прохождении ударной волны через измерительное сечение трубы. Спектральный канал ВД ($\lambda = 500\text{--}1100$ нм) собран на базе спектрографа

Horiba SP140-1603. Для измерения абсолютных интенсивностей излучения в спектрах ударно-нагретого газа системы регистрации излучения калибровались путем стандартной процедуры сравнения с излучением известного калибровочного источника, в качестве которого использовалась дейтериевая лампа Hamamatsu для УФ-диапазона и лампа накаливания СИ-10 для ВД-диапазона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Искровое воспламенение гремучей смеси приводит к образованию поперечных волн сжатия, которые выравнивают давление в форкамере, где из-за малого сечения сопел диска сжигание смеси происходит в режиме, близком к режиму горения при постоянном объеме. Рост давления приводит к струйному истечению продуктов горения через отверстия перфорированного диска в основную часть КВД, заполненную в нашем случае той же горючей смесью. Близкие по интенсивности и составу струи обеспечивают однородное в радиальном направлении воспламенение газа в КВД. Возникающий фронт пламени генерирует практически плоскую ударную волну на расстоянии трех калибров от форкамеры.

Процесс формирования ударной волны в КВД показан на рис. 2. Видно, что при наличии форкамеры (рис. 2а) датчик давления P1, расположенный на расстоянии одного калибра от форкамеры (см. рис. 1), регистрирует достаточно крутой ска-

¹⁾ ПЗС – прибор с зарядовой связью.

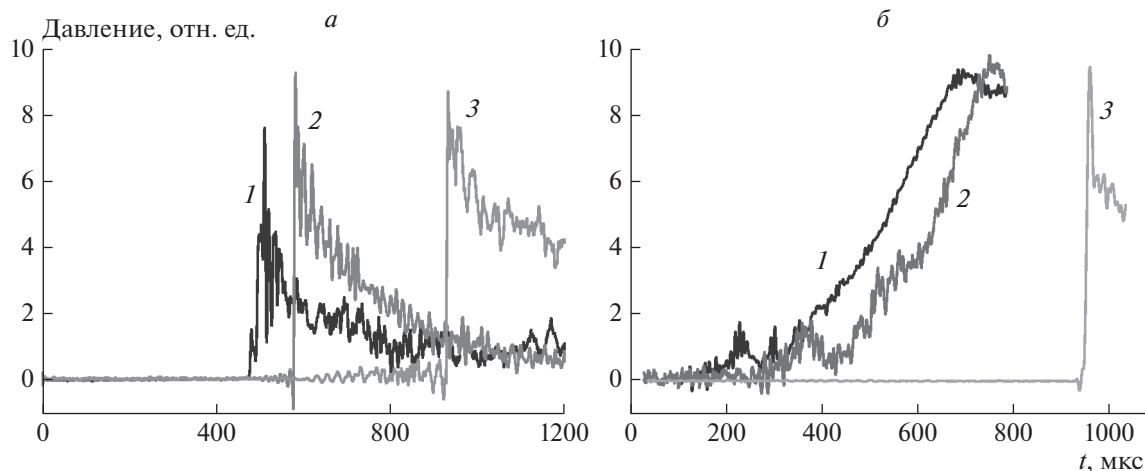


Рис. 2. Регистрация ударной волны в КВД датчиками давления при наличии форкамеры (а) и без форкамеры (б): 1 – сигнал с датчика давления P1, 2 – сигнал с датчика давления P2, 3 – сигнал с датчика давления P3.

чок давления, в то время как датчик давления P2 (три калибра от форкамеры) фиксирует уже сформировавшуюся ударную волну. Иная картина наблюдается при отсутствии форкамеры в КВД (рис. 2б). В этом случае плоский фронт УВ формируется на расстоянии более 10 калибров, так как только датчик P3, расположенный на расстоянии 11 калибров от форкамеры, регистрирует резкое нарастание давления.

К моменту подхода к диафрагме, разделяющей КВД и КНД, ударная волна успевает значительно опередить фронт пламени. Интенсивная УВ может разрушить диафрагму до полного сгорания смеси, заполняющей КВД. В этом случае запасенная энергия гремучей смеси используется не полностью. В модернизированной установке материал и толщина диафрагмы, а также давление и состав газа в КВД подбираются так, что диафрагма не разрушается при отражении от нее ударной волны, бегущей перед пламенем. В то же время это отражение должно обеспечить взрывное воспламенение газа у диафрагмы. Взрывной рост давления и температуры за счет выделяющейся теплоты горения приводит к формированию пережатой детонации, распространяющейся навстречу пламени и догоняющей ее волны разрежения, которая возникает в результате разрушения диафрагмы. Волна разрежения обеспечивает быстрый переход детонации в режим Чепмена–Жуге и полное сгорание газа в КВД. Интенсивность ударной волны, формирующейся в КНД, определяется работой, которую могут совершить продукты горения газа, запасенного в КВД. Необходимо отметить, что даже при полном сгорании газа продукты дефлаграционного (медленного) горения совершают меньшую работу, чем при горении в режиме детонации Чепмена–Жуге [37].

Таким образом, описанная модернизация ударной трубы позволяет повысить работоспособность продуктов горения гремучей смеси в первую очередь за счет ее полного сгорания, а также за счет того, что часть смеси в КВД сгорает в энергетически наиболее выгодном режиме детонации Чепмена–Жуге. Это дало возможность впервые в практике эксплуатации ударных труб с горением газообразного топлива в КВД получить ударные волны, моделирующие условия входа космических аппаратов в атмосферу Земли со второй космической скоростью. Дополнительно решен ряд технических проблем, таких как обеспечение плавного раскрытия диафрагмы (отсутствие летящих лепестков), практически полная повторяемость выбранных режимов и защита поджигающего устройства от воздействия отраженной ударной волны.

В ударной трубе DDST-M была проведена серия экспериментов по исследованию радиационных характеристик ударно-нагретого воздуха в диапазонах значений скорости ударной волны 4.2–11.4 км/с и давления газа перед фронтом ударной волны $p_0 = 33.25\text{--}931$ Па. На рис. 3 приведено сравнение параметров DDST-M с соответствующими параметрами других ударных установок по моделированию условий входа КА в атмосферу Земли с орбитальными и сверхорбитальными скоростями в координатах ($H, V_{УВ}$), где H – высота над поверхностью Земли, а $V_{УВ}$ – скорость ударной волны. Как правило, экспериментальные условия (точки на рис. 3) подбираются в соответствии с траекторией спуска КА. Это хорошо видно из данных, полученных в ударном туннеле T6 Stalker [38], которые соответствуют траекториям КА, возвращаемых с Луны и Марса. Аналогичные данные, моделирующие условия возвращения КА с Луны, получены в ударных трубах HVST [39] и ADST [16]. Наибольшее количество информа-

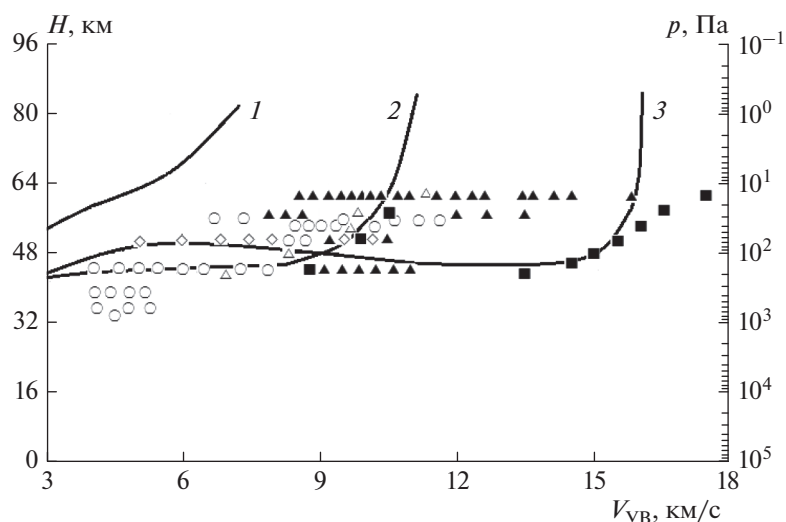


Рис. 3. Экспериментальные условия, реализуемые в ударных установках, на фоне траекторий входа КА в атмосферу Земли: 1 – Space Shuttle, 2 – возвращение с Луны, 3 – возвращение с Марса; ■ – Т6, ▲ – EAST, △ – HVST, ◇ – ADST, ○ – DDST-M.

ции по излучению ударно-нагретого газа в различных условиях, реализуемых за спускаемыми КА, получено в ударном туннеле EAST [40]. Возможности этой ударной установки позволяют моделировать условия, возникающие при возвращении любых спускаемых КА. Как видно из рис. 3, параметры ударной трубы DDST-M несколько ниже параметров, реализуемых на поршневых и электроразрядных ударных установках, но вполне вписываются в рамки моделирования условий входа КА в атмосферу Земли со второй космической скоростью.

На рис. 4 приведен пример интегральной по времени развертки излучения (панорамный спектр) в интервале длин волн 190–1100 нм (УФ- и видимый диапазон) при скоростях ударной волны 7.7 и 11.4 км/с. Анализ подобных панорамных спектров позволяет выделить особенности излучения ударно-нагретого газа на различных участках в зависимости от скорости ударной волны и начального давления газа. Сравнение спектральных характеристик, приведенных на рис. 4, показывает, что с увеличением скорости ударной волны интенсивность излучения резко возрастает. Рассмотрим характерные особенности изменения интенсивности излучения в спектре ударно-нагретого воздуха при увеличении скорости ударной волны от 7 до 11.4 км/с.

При значениях скорости УВ менее 8.5 км/с в спектрах излучения наблюдаются только молекулярные полосы молекул N_2 (275–400 нм), NO (190–300 нм), радикала CN (330–425 нм) и молекулярного иона N_2^+ (300–500 нм), группа атомарных линий азота при 857–867 нм и кислорода при 557, 777, 822, 845 и 926 нм. В спектрах при всех

значениях скорости практически всегда присутствуют дублеты линий Na (589 нм), Li (671 нм) и K (766, 770 нм), линии ионов кальция (393 и 397 нм) и линии меди (327 нм). Возможно, излучение линий щелочных металлов и кальция связано с люминесценцией кварцевого стекла окон наблюдения под действием сильного излучения из области вакуумного ультрафиолета (<185 нм), возникающего за фронтом ударной волны. С повышением скорости ударной волны повышается интенсивность молекулярных полос $N_2(2^+)$, $N_2^+(1^-)$ и CN (фиолетовая система), а интенсивность полос NO изменяется незначительно. При скоростях выше 8.5 км/с в спектрах идентифицируются атомарные линии азота при 601, 649, 664, 747, 822, 939, 986 и 1054 нм. Также наблюдаются атомарные линии углерода при 193 и 247 нм.

Причины появления в спектрах излучения полос CN (фиолетовая система) и атомарных линий углерода связаны с присутствием в окружающем воздухе CO_2 (до 0.3%), а также с использованием технических газов в составе толкающего газа в камере высокого давления, в которых содержание углеродсодержащих компонент может достигать 0.1%. После эксперимента водяные пары и углеродсодержащие примеси, конденсируются на стенках ударной трубы и довольно сложно поддаются откачке. Из экспериментов установлено, что пары воды откачиваются за время не менее чем 6 ч, что хорошо контролируется по линиям водорода H_α и H_β . Для откачки и удаления со стенок трубы углеродсодержащих примесей требуются дополнительные меры. Похожие проблемы существуют и на других установках, например, в электроразрядной ударной трубе EAST [41].

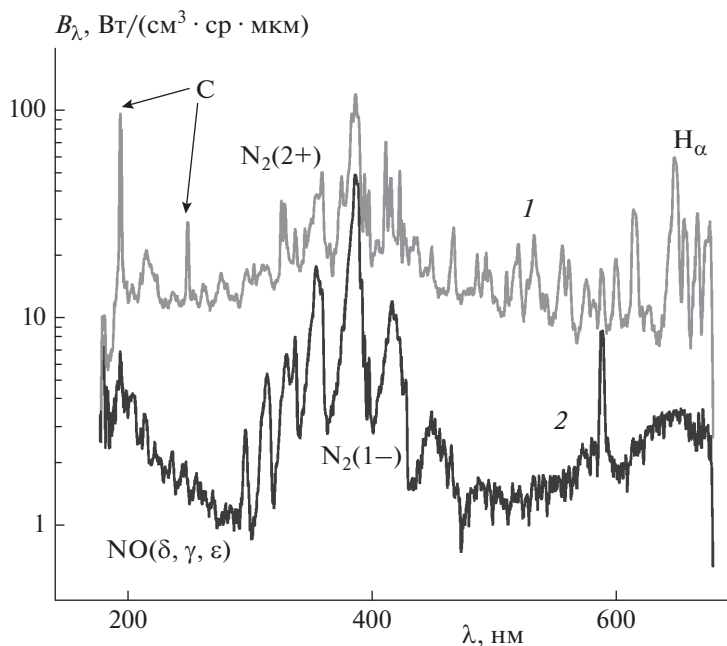


Рис. 4. Панорамный спектр излучения ударно-нагретого воздуха при давлении перед ударной волной $p_0 = 33.35$ Па и скоростях ударной волны $V_{УВ} = 7.7$ (спектр 2) и 11.4 км/с (спектр 1).

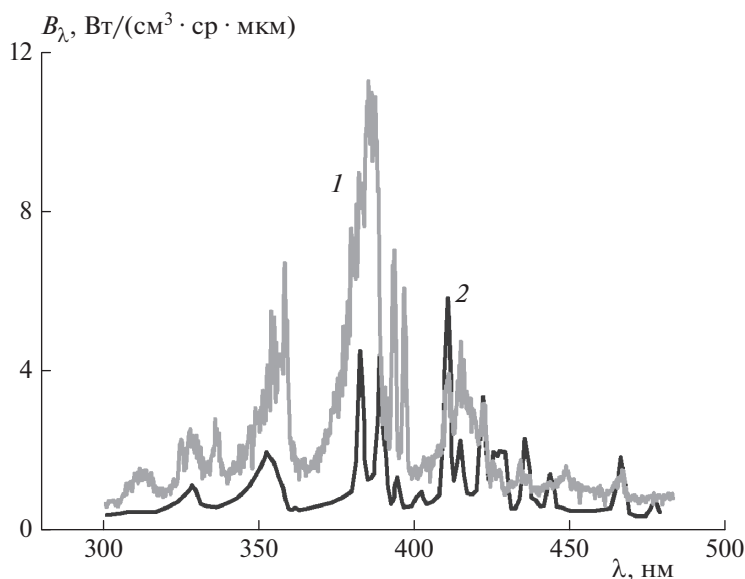


Рис. 5. Сравнение панорамных спектров излучения воздуха, полученных в ударной трубе DDST-M ($p_0 = 33.35$ Па, $V_{УВ} = 10.4$ км/с, спектр 1) и в ударной установке EAST ($p_0 = 26.6$ Па, $V_{УВ} = 10.35$ км/с, спектр 2).

Интересно сравнить результаты измерения спектральных характеристик воздуха в ударной трубе DDST-M с результатами других исследований. Как уже отмечалось выше, наибольшее количество информации по излучению ударно-нагретого воздуха получено в ударном туннеле EAST. На рис. 5 представлено сравнение панорамных спектров, полученных в ударных установках DDST-M и

EAST [42] примерно в одинаковых условиях. Видно, что обе спектральные кривые качественно схожи. Данные настоящей работы лежат несколько выше результатов измерений, полученных на установке EAST, что можно объяснить более высоким давлением в экспериментах на DDST-M. Наибольшее различие наблюдается в области спектра 370–420 нм, где большую роль играет излучение

радикала CN, концентрация которого сильно зависит от содержания в исследуемом воздухе CO₂.

ВЫВОДЫ

1. Представленная модернизация ударной трубы позволяет впервые в практике эксплуатации ударных труб с детонационным горением в КВД получить ударные волны, моделирующие условия входа космических аппаратов в атмосферу Земли со сверхорбитальной скоростью.

2. Дополнительно решен ряд технических проблем, таких как обеспечение плавного раскрытия диафрагмы, практически полная повторяемость результатов и защита поджигающего устройства от разрушающего воздействия отраженной ударной волны.

3. В серии экспериментов по исследованию радиационных характеристик ударно-нагретого воздуха в диапазонах значений скорости ударной волны 4.2–11.4 км/с и давления газа перед фронтом ударной волны $P_0 = 33.25\text{--}931$ Па показано, что с увеличением скорости ударной волны интенсивность излучения резко возрастает.

Работа выполнена при поддержке грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 20-08-00343, а также в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Экспериментальное и теоретическое исследование кинетических процессов в газах” (регистрационный номер АААА-А19-119012990112-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суржиков С.Т. // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 2. С. 249.
2. Experimental methods of shock wave research / Eds. Igra O., Seiler F. N.Y.: Springer, 2016.
3. Shang J.S., Surzhikov S.T. // Prog. Aerospace Sci. 2012. V. 53. P. 46.
4. Reyner P. // Prog. Aerospace Sci. 2016. V. 85. P. 1.
5. Sharma S.P., Park C. // J. Thermophys. Heat Trans. 1990. V. 4. P. 266.
6. Stalker R.J., Paull A., Mee D.J., Morgan R.G., Jacobs P.A. // Prog. Aerospace Sci. 2005. V. 41. P. 471.
7. Morgan R.G. // AIAA Paper. 1997. № 97-0279.
8. Gu S., Olivier H. // Prog. Aerospace Sci. 2020. V. 113. № 100607.
9. Brandis A.M., Johnston C.O., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D. // J. Thermophys. Heat Trans. 2015. V. 29. P. 209.
10. Lemal A., Jacobs C.M., Perrin M.-Y. et al. // J. Thermophys. Heat Trans. 2016. V. 30. P. 197.
11. Cruden B.A., Prabhu D., Martinez R., Le H. // AIAA Paper. 2010. № 2010-4508.
12. Wadhams T.P., Cassady A.M., MacLean M., Holden M.S. // Ibid. 2009. № 2009-677.
13. Dufrene A., Holden M. // Ibid. 2011. № 2011-626.
14. Gorelov V.A., Kireev A.Yu., Shilenkov S.V. // Ibid. 2004. № 2004-2308.
15. Горелов В.А., Киреев А.Ю., Шиленков С.В. // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 2. С. 13.
16. Горелов В.А., Киреев А.Ю. // Там же. 2016. Т. 57. № 1. С. 176.
17. Wei H., Morgan R.G., McIntyre T.J. // AIAA Paper. 2017. № 2017-4531.
18. Takayanagi H., Lemal A., Nomura S., Fujita K. // Ibid. № 2017-1369.
19. Collen P.L., Doherty L.J., McGilvray M. et al. // Ibid. 2019. № 2019-1941.
20. Lino da Silva M.,erreira R., Vargas J. et al. // Ibid. 2020. № 2020-0624.
21. Li C., Sun R., Wang Y., Chen X., Bi Z. // 5th Intern. Conf. Exp. Fluid Mech. Munich, 2018; <https://athene-forschung.unibw.de/doc/124226/124226.pdf>
22. Chue R.S.M., Tsai C.Y., Bakos R.J. // Shock Waves. 2003. V. 13. P. 367.
23. Tsai C.Y., Chue R., Nicilson C., Tyll J. // AIAA Paper. 2009. № 2009-1516.
24. Hombsch M., Oliver H. // J. Spacecraft Rockets. 2013. V. 50. P. 742.
25. Yuan C.K., Zhou K., Liu Y.F., Hu Z.M., Jiang Z.L. // Acta Mech. Sin. 2019. V. 35. P. 24.
26. Wang Q., Luo K., Li J., Li J., Zhao W. // Sin. J. Aeronaut. 2020. V. 33. P. 1468.
27. Анохин Е.М., Иванова Т.Ю., Кудрявцев Н.Н., Стариковский А.Ю. // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 6. С. 807.
28. Косарев И.Н., Нуднова М.М., Сагуленко П.Н., Хорунженко В.И., Кудрявцев Н.Н. // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 6. С. 747.
29. Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Yu. et al. // J. Chem. Phys. 2013. V. 139. № 034317.
30. Dikalyuk A.S., Surzhikov S.T., Kozlov P.V., Shatalov O.P., Romanenko Yu.V. // AIAA Paper. 2013. № 2013-2505.
31. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Ибрагимова Л.Б. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 35.
32. Левашов В.Ю., Козлов П.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 16.
33. Anderzhanov E.K., Medvedev S.P., Tereza A.M., Khomik S.V., Khristoforov B.D. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. № 012074.
34. Медведев С.П., Хомик С.В., Гельфанд Б.Е. // Хим. физика 2009. Т. 28. №12. С. 52.
35. Хомик С.В., Медведев С.П., Вейссьер Б., Оливье Г., Максимова О.Г., Сильников М.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 8. С. 1666.
36. Medvedev S.P., Khomik S.V., Tereza A.M., Chernyshov M.V., Levikhin A.A. // J. Adv. Res. Dynam. Control Systems. 2020. V.12. P. 1021.
37. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453.
38. McGilvray M., Doherty L.J., Morgan R.G., Gild D.E. // AIAA Paper. 2015. № 2015-3545.
39. Yamada G., Suzuki T., Takayanagi H., Fujita K. // Trans. Jap. Soc. Aero. Space Sci. 2011. V. 54. № 183. P. 51.
40. Brandis A.M., Johnston C.O., Cruden B.A., Prabhu D.K. // J. Thermophys. Heat Trans. 2017. V. 31. P. 178.
41. Johnston C.O. // AIAA Paper. 2008. № 2008-1245.
42. Brandis A.M., Cruden B.A., Prabhu D. et al. // AIAA Paper. 2010. № 2010-4545.