

УДК 53.07:53.09:53.043

doi: 10.53816/23061456_2024_11–12_71

**УДАРНАЯ ТРУБА — ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ. ОБЗОР**

**SHOCK TUBE IS A TOOL FOR STUDYING SHOCK WAVE PROCESSES.
A REVIEW**

С.Н. Васильева, канд. техн. наук И.В. Гук

S.N. Vasilieva, Ph.D. I.V. Guk

НПО Спецматериалов

В статье представлен обзор конструкций ударных труб, позволяющих генерировать ударные волны с различными параметрами фазы сжатия. Описаны различные способы генерации ударной волны в ударных трубах. Отмечены преимущества и недостатки использования клапанов и разрывных диафрагм для разделения камеры высокого давления и камеры низкого давления. Показано, что форма сечения камеры низкого давления влияет на форму фронта генерируемой ударной волны. Описаны способы и методы регистрации данных, получаемых при проведении экспериментальных исследований. Представленная информация позволяет сделать вывод, что ударные трубы — незаменимый инструмент изучения ударно-волновых процессов, позволяющий не только качественно, но и количественно оценивать картину высокоскоростного течения газа и сопутствующие явления.

Ключевые слова: ударная труба, ударная волна, эксперименты, исследования, датчики.

The article presents an overview of shock tube designs that allow generating shock waves with different compression phase parameters. Various methods of shock wave generation in shock tubes are described. The advantages and disadvantages of using valves and bursting diaphragms to separate the high-pressure chamber and the low-pressure chamber are noted. It is shown that the shape of the section of the low-pressure chamber affects the shape of the front of the generated shock wave. The methods and methods of recording data obtained during experimental studies are described. The presented information allows us to conclude that shock tubes are an indispensable tool for studying shock wave processes, which allows not only qualitatively but also quantitatively assessing the picture of high-speed gas flow and related phenomena.

Keywords: shock tube, shock wave, experiments, research, sensors.

Введение

Применение ударных труб для экспериментальных исследований процессов в ударных волнах (УВ) и ударно-волновых взаимодействиях находит практику в течение многих лет.

УВ возможно изучать при взрывах в свободном пространстве, однако УВ, распространяющаяся в ударной трубе, гораздо более удобный объект исследования, так как ее распространение заключено в замкнутом объеме, а вторичные эффекты взрыва не влияют на параметры УВ, что

значительно упрощает картину газодинамического течения, позволяя сосредоточить внимание на конкретных аспектах ударно-волнового взаимодействия.

Разнообразие ударных труб позволяет проводить широкий спектр исследований начиная от поведения материалов в экстремальных условиях (ударно-волновая нагрузка) до разработки методик испытаний взрывозащитных образцов [1]. Правильная постановка эксперимента в ударных трубах позволяет получить достоверные и точные результаты, которые могут быть использованы для проверки теоретических моделей и разработки новых технологий или материалов.

Конструкция ударных труб

Основной принцип действия ударных труб довольно прост: УВ образуется при движении того или иного вида поршня или разрыва диафрагмы [2]. В классических конструкциях ударных труб (рис. 1), где давление во фронте УВ обеспечивается стандартной подкачкой газа в камеру высокого давления (КВД) до определенного давления [4], существуют двухдиафрагменные схемы (рис. 2) [3].

В двухдиафрагменной схеме (рис. 2) последовательно соединены КВД с толкающим газом, камера промежуточного давления (КПД) с толкающим газом, камера низкого давления (КНД). Двухдиафрагменные ударные трубы бывают различных видов в зависимости от толщины диафрагмы между КПД и КНД. Например, ударные трубы, использующие эффект отраженной УВ, имеют следующий принцип действия: УВ, возникающая в КВД, испытыва-

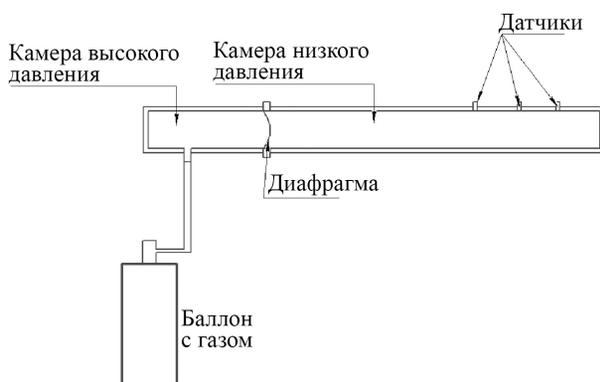


Рис. 1. Схема простейшей цилиндрической ударной трубы

ет нормальное отражение от диафрагмы, установленной между КПД и КНД, давление в КПД возрастает и происходит разрыв диафрагмы. Двухдиафрагменная ударная труба с нестационарным расширением потока имеет довольно тонкую диафрагму между КПД и КНД, при подходе УВ от КВД она разрывается, в результате чего образуется сильная УВ. Принцип действия ударной трубы двухдиафрагменной конструкции также осуществлен в многодиафрагменных ударных трубах [3].

Для генерации сильных УВ можно увеличить отношение внутренних энергий и давлений газов, разделенных диафрагмой. Для получения наиболее сильных УВ используется толкающий газ с минимальным молекулярным весом (водород или гелий) при максимальных практически доступных температурах и давлениях, обеспечиваемых с помощью газодинамического, химического, электрического способов подогрева [5]. Например, в электромагнитных/магнитных ударных трубах для создания УВ используются эффекты нагревания газа при электрическом разряде и ускорения его под действием магнитных сил (Т-образная трубка Фаулера).

Принцип работы трубки Фаулера: трубка наполняется исследуемым газом под низким давлением. В перекладину «буквы Т» введены электроды и через газ разряжается конденсаторная батарея. Газ в разряде быстро нагревается до высокой температуры и под действием высокого давления с большой скоростью переходит в «вертикальную» трубку, толкая перед собой УВ [6].

Помимо описанной трубки Фаулера, для обеспечения нагрева газа в КВД и получения более сильных УВ используются:

1. Внешнее нагревание. Например, способ подогрева газа извне с помощью пламени, электрического подогрева или другого источника тепла. Стоит отметить, что из-за зависимости метода от теплопроводности через стенки КВД количество тепла, которое можно подвести внешним нагреванием, ограничено;

2. Внутреннее нагревание с помощью твердых нагревательных элементов. Подогрев газа происходит с помощью твердых нагревательных элементов, помещенных в КВД;

3. Внутреннее нагревание с помощью электрического разряда. Газ высокого давления мож-

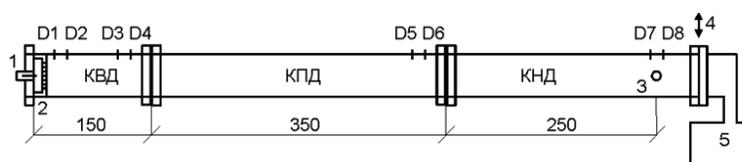


Рис. 2. Схема двухдиафрагменной ударной трубы: 1 — свеча зажигания; 2 — форкамера; 3 — кварцевое окно; 4 — вентильная заслонка; 5 — демпферный бак; 6 — D1...D8 датчики давления

но быстро нагреть до высокой температуры путем непосредственного пропускания через него электрического тока;

4. Нагревание с помощью внутреннего горения.

Между камерами высокого и низкого давления помещается либо пропускной быстродействующий клапан, либо диафрагма. Быстродействие клапана будет влиять на параметры воздушной УВ. Одним из несомненных преимуществ использования клапанов является отсутствие осколков (в отличие от использования диафрагм). Помимо этого, при использовании клапанов достигается:

- точная повторяемость результатов;
- повышение производительности исследований, так как ударную установку не требуется разбирать после предыдущего опыта, в отличие от ударных труб с диафрагмами, которые требуется менять после каждого эксперимента;
- автоматизация экспериментального процесса.

Одним из главных недостатков использования клапана является некоторое время задержки до его полного открытия.

Для диафрагм в ударных трубах могут применяться различные материалы, например: майлар, целлофан, полиэтилен, медь, алюминий или сталь. В зависимости от выбора материала, можно также устранить осколочные потоки от разорванных диафрагм. Каждый материал в зависимости от своей толщины имеет различное давление разрыва, что позволяет легко варьировать давление при проведении экспериментальных исследований. Подобные диафрагмы могут применяться для начальных давлений в КВД вплоть до 100 атм [7].

Выбор формы сечения ударной трубы зависит от вида и объекта исследования. Например, различие использования труб постоянного и переменного сечения состоит в том, что в трубах постоянного сечения формируется УВ с прямо-

угольным профилем, а в трубах переменного сечения — с треугольным профилем (рис. 3).

С помощью ударной трубы с постоянным сечением возможно моделировать гидроудары, а с помощью ударной трубы с расширяющимся сечением — УВ, возникающие при взрывах сосудов высокого давления или подрывах взрывчатых веществ.

Помимо формы постоянного или расширяющегося сечения, ударные трубы также могут быть круглого или прямоугольного сечения. Выбор конкретной формы — основывается на целях исследования и методе, используемом для регистрации результатов. Например, для измерений с использованием оптических методов (таких как шпирен-метод — в котором используются изменения показателей преломления, чтобы увидеть и сфотографировать воздушный поток) требуется применение точно обработанных плоскопараллельных смотровых стекол, поэтому предпочтительнее использовать ударные трубы прямоугольного сечения. Однако же для спектрографических исследований будет предпочтительнее труба круглого сечения с небольшими вмонтированными плоскими стеклами, так как из-за геометрических особенностей данную трубу менее трудоемко отчищать от продуктов горения и ионизации.

Внутренние размеры КНД у ударных труб могут быть различны, диаметр сечения влияет на характер потока газа: влияние стенок и пограничного слоя в узкой трубе будет значительно больше, чем в трубе большого сечения. Например, для исследований процессов ударно-волнового взаимодействия с объектами (задача аэродинамики) рекомендуется использовать ударные трубы большого сечения для размещения объектов в центре ударной трубы, так как при больших числах Рейнольдса влияние вязкости существенно будет проявляться в области течения, непосредственно прилегающей к стенке канала.

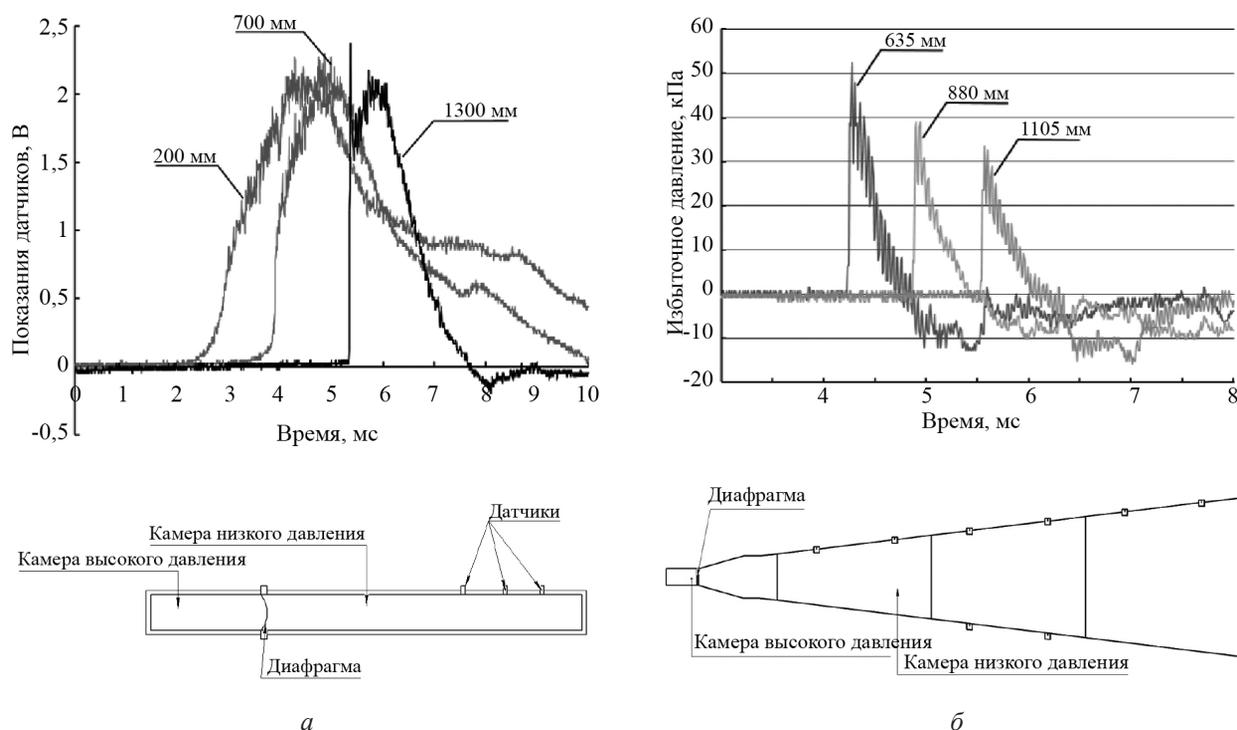


Рис. 3. Различия в форме фронта: а — ударная труба с постоянным сечением; б — ударная труба с равномерно расширяющимся сечением (коническая ударная труба)

Помимо ударных труб постоянного и переменного сечения, существуют ударные трубы со скачкообразно изменяющейся площадью поперечного сечения [8]. Такие ударные трубы создают более высокое давление по сравнению с обычными, так как стационарное течение разрежения в них ускоряет толкающий газ. Виды ударных труб со скачкообразным сечением приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведено сравнение максимальных чисел Маха УВ в зависимости от началь-

ного давления в КВД, достижимых в ударных трубах.

Ударные трубы могут различаться также материалом стенок. Подробное изучение материалов, используемых для изготовления стенок ударных труб, показало, что основными материалами являются: медь, стекло, сталь [2, 9, 12]. Для проведения спектрографических исследований наиболее предпочтительны медные и стеклянные стенки ударных труб. Это объясняется тем, что при спектрографических исследова-

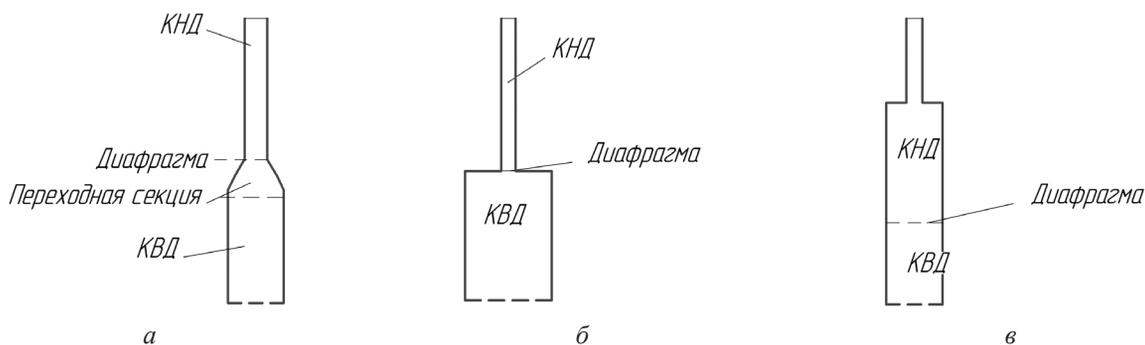


Рис. 4. Ударные трубы со скачкообразным изменением площади поперечного сечения: а — изменение сечения в месте расположения диафрагмы, КВД с конечной площадью поперечного сечения; б — то же, камера с бесконечной площадью поперечного сечения; в — изменение сечения в некотором месте КНД

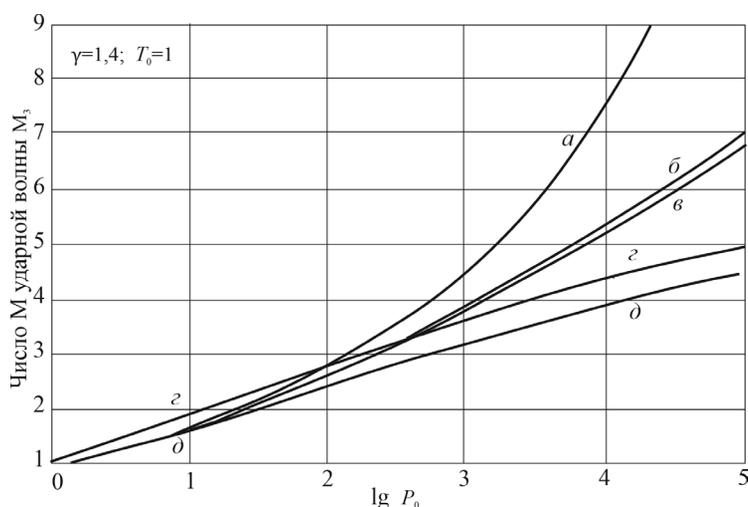


Рис. 5. Сравнение максимальных чисел Маха УВ в зависимости от начального давления в КВД, достижимых в ударных трубах: а — многодиафрагменная ударная труба; б — двухдиафрагменная ударная труба, использующая эффект отражения ударной волны; в — двухдиафрагменная ударная труба с нестационарным расширением потока; г — ударная труба со скачкообразным изменением сечения; д — простейшая ударная труба

дованиях в общем спектре присутствуют линии материала стенок трубы. Помимо указанных параметров, данные материалы обладают рядом преимуществ по сравнению со стальными ударными трубами.

Медь позволяет наименее трудоемко устанавливать дополнительные детали и системы регистрации данных, так как дополнительные элементы возможно впаять с внешней стороны.

Выполненные из стекла стенки ударной трубы подходят для изучения оптического излучения углеводородов и химических процессов при ударно-волновых процессах.

Одним из главных недостатков медных и стеклянных ударных труб является невозможность работы с высокими давлениями, так как данные материалы выдерживают лишь несколько атмосфер. Для работы с высокими давлениями обычно используются ударные трубы из нержавеющей стали либо выполненные из оружейных стволов.

Разнообразие конструкций ударных труб (материалы, формы сечения и пр.) позволяет проводить множество исследований с различными скоростями УВ, профилями давления. Стоит отметить, что в зависимости от целей, задач и объектов исследования каждый из описанных ранее параметров должен быть подобран так, чтобы обеспечивать возможность установки регистрирующих систем.

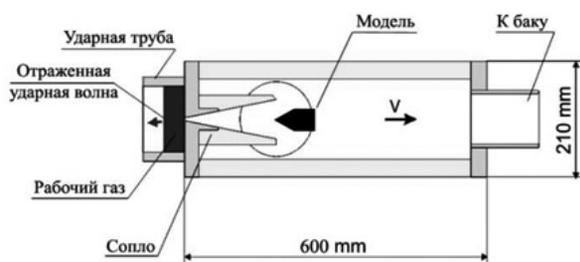
Методы регистрации данных

На ударных трубах возможно проводить различные по направлениям исследования, которые требуют определенной постановки эксперимента и методов регистрации данных [6, 10–11]. В данной части статьи будут представлены лишь некоторые исследования и способы регистрации данных, использованные при проведении экспериментов, которые возможно проводить в ударных трубах.

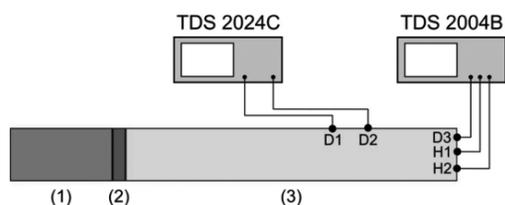
В работе [12] целью исследования является изучение тепловых потоков, возникающих при внешнем обтекании модели сверхзвуковым потоком газа. Для проведения исследования были использованы две ударные трубы, отличающиеся геометрией каналов (рис. 6, а, б) и диапазоном достижимых газодинамических параметров.

В качестве метода регистрации теплового потока были использованы два различных типа датчиков. В качестве основного использовался датчик на анизотропных термоэлементах из висмута, обладающий временем отклика 10 нс, и тонкопленочный датчик сопротивления, который применялся в качестве контрольного, со временем отклика 1 мкс (рис. 7).

Одновременное измерение теплового потока с помощью двух датчиков с различным принципом действия в исследовании [13] позволило повысить достоверность полученных результатов.



а



б

Рис. 6. Схемы ударных труб, использованных в исследовании [12]: а — схема рабочей камеры ударной трубы с соплом — большой ударной трубы; б — схема экспериментальной установки — малой ударной трубы: 1 и 2 — камера высокого и низкого давления; 3 — блок диафрагм; D1–D3 — датчики давления; H1 — датчик на анизотропных термозлементах; H2 — тонкопленочный датчик сопротивления



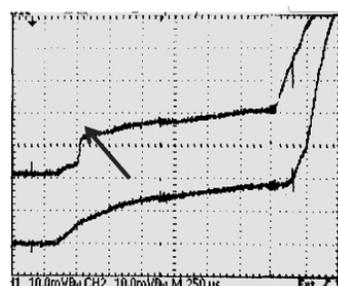
а



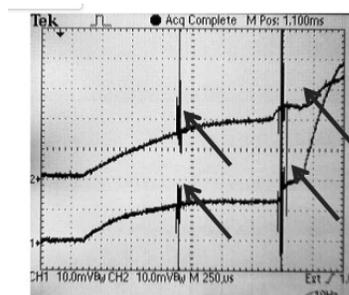
б

Рис. 7. Метод регистрации теплового потока: а — пластиковая модель с б тепловыми датчиками; б — металлическая модель с 2 тепловыми датчиками

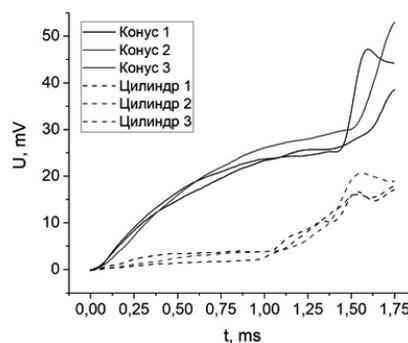
После регистрации параметров теплового потока с помощью датчиков впоследствии требовалось не только перевести их в требуемые величины, но также и наладить функцию сглаживания посторонних шумов (рис. 8).



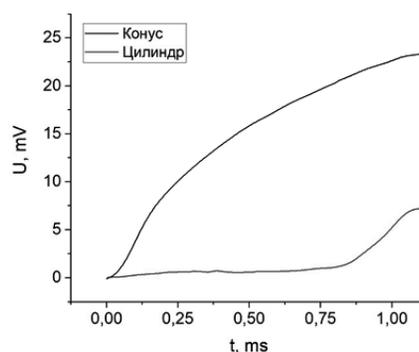
а



б



в



г

Рис. 8. Типичный сигнал теплового датчика: а — необработанный сигнал с датчиков на пластиковой модели, искаженный импульсными помехами; б — необработанный сигнал с датчиков на металлической модели, искаженный импульсными помехами; в — обработанный сигнал с датчиков на пластиковой модели; г — обработанный сигнал с датчиков на металлической модели

Заметные колебания температуры поверхности, пропорциональные электрическому сигналу, привели к существенным колебаниям рассчитанного теплового потока. По этой причине было уделено особое внимание подготовке исходного электрического сигнала при низком соотношении сигнал/шум.

Несмотря на трудоемкий процесс постобработки данных, полученных при регистрации, верифицированная с помощью двух способов измерения система является довольно точным методом измерения тепловых потоков при сверхзвуковом обтекании тел.

Исследование [14] показывает возможность использования ударных труб для изучения радиационных процессов в высокотемпературных газовых потоках. В данном случае регистрировалось испускание и поглощение света в тепловом потоке спектральными измерениями. Схема установки представлена на рис. 9.

Помимо использования спектрографического метода для регистрации излучения ударно-нагретого газа, через оптические окна из плавленого кварца, также регистрировались скорость и давление во фронте ударной волны с помощью пьезодатчиков P8–P7, установленных на стенке ударной трубы.

Для измерения эволюции излучения во времени в ударно-сжатом слое в системе регистрации предусмотрены два канала, где первый постоянно измеряет излучение в диапазоне 200–850 нм, а второй канал используется для регистрации измерений в выделенном

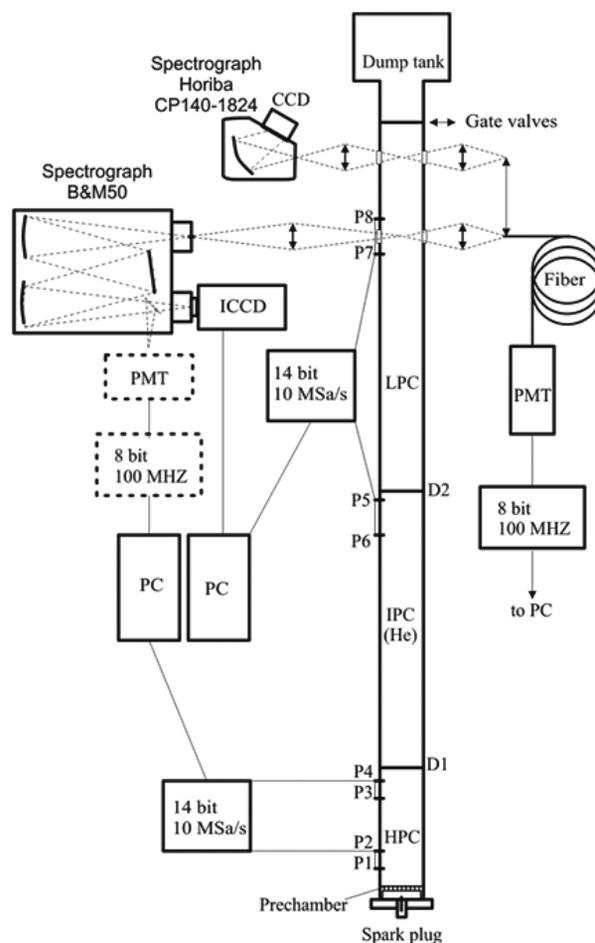


Рис. 9. Схема установки двухдиафрагменной ударной трубы

спектральном интервале. Результаты, полученные при проведении данного исследования, представлены на рис. 10.

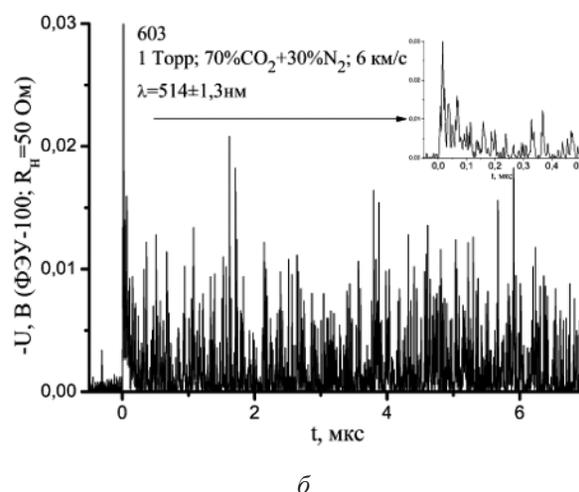
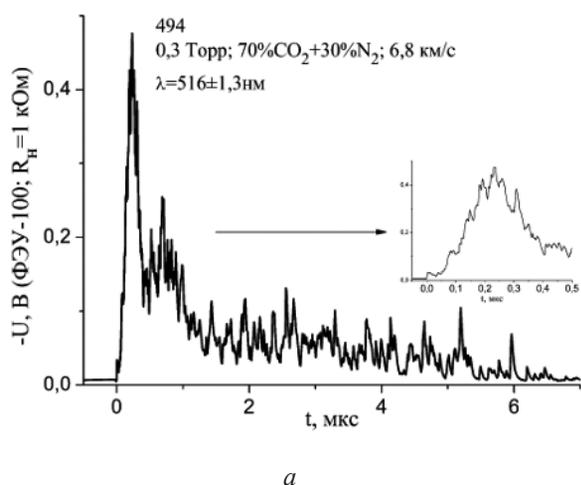


Рис. 10. Эволюции во времени излучения различных молекулярных полос в смеси 70 % CO₂ + 30 % N₂; полосы Свана молекулы C₂

В потоке газа, формирующемся в сверхзвуковых аэродинамических трубах, присутствуют различные фоновые возмущения, в исследовании [15] утверждается, что фон определяется в основном звуком, который излучает турбулентный пограничный слой, образующийся на стенках сопла и рабочей части. Влияние трубного фона на некоторые исследуемые характеристики (например, в исследовании [13]) создает значительные трудности при постобработке результатов экспериментов. Исследование [15] было направлено на изучение пульсаций давления в сверхзвуковых аэродинамических трубах кратковременного и длительного действия при числе Маха, равным 6. Схема аэродинамической ударной трубы, использованной в эксперименте, представлена на рис. 11.

В ходе выполнения данной работы решалась и методическая задача. Она связана с кратковременностью квазистационарного процесса в ударной трубе и со стохастическим характером возмущений, генерируемых в аэродинамической трубе, а также необходимостью большого числа реализаций для получения надежных результатов. Для этого градуировка датчиков осуществлялась статическим методом и проводилась как в ходе эксперимента, так и после него. Полученные результаты представлены на рис. 12.

Для исследований турбулентного перемешивания в экспериментах на ударных трубах применяются различные методы визуализации. Например, в исследовании [16] использовались:

- а) визуализация теньвым методом с регистрацией скоростной кинокамерой СФР;
- б) визуализация зоны турбулентного перемешивания методом лазерного ножа с регистрацией течения в однокадровом режиме.

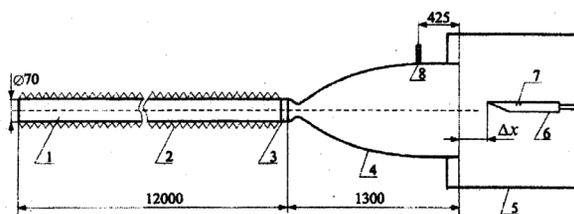


Рис. 11. Схема аэродинамической трубы [10]:
1 — канал трубы; 2 — омический подогреватель;
3 — диафрагменный отсек; 4 — профилированное сопло; 5 — рабочая часть; 6 — модель; 7 — датчик пульсации давления Kulite на модели; 8 — датчик пульсации давления Kulite

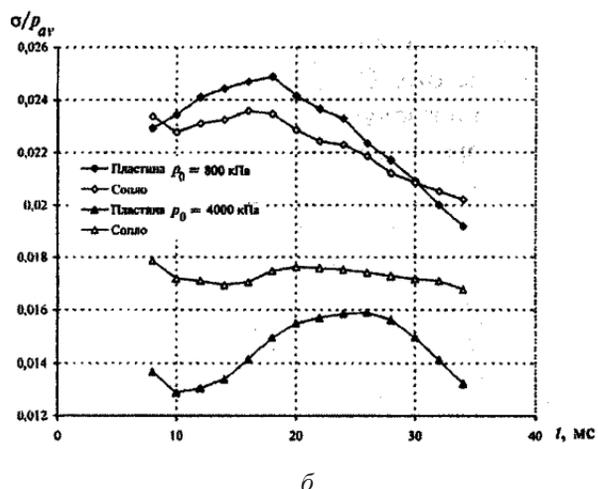
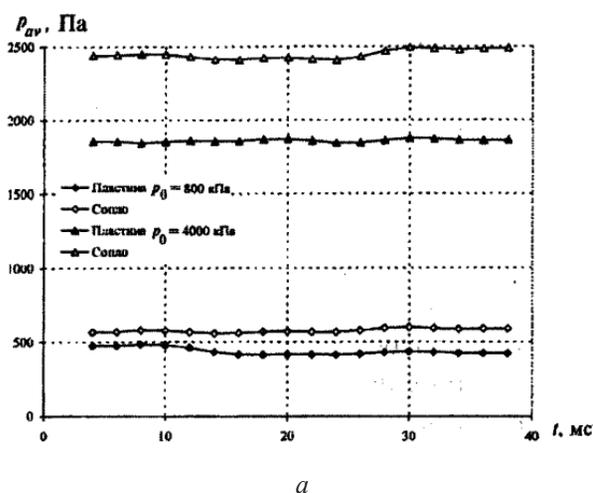


Рис. 12. Измерение среднего давления и среднеквадратичных уровней пульсационной составляющей

Для изучения турбулентных течений исследователями [16] использовалась цилиндрическая ударная труба, схема измерительной секции представлена на рис. 13.

Картина течения, полученная при визуализации теньвым методом показана на рис. 14, а фотографии, полученные методом лазерного ножа, на рис. 15.

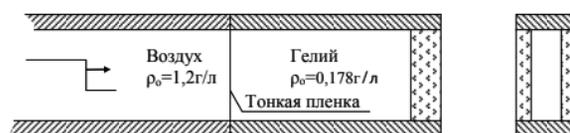


Рис. 13. Схема измерительной секции ударной трубы в экспериментах по исследованию развития зоны турбулентного перемешивания на плоской границе воздух — гелий, ускоряемой ударными волнами

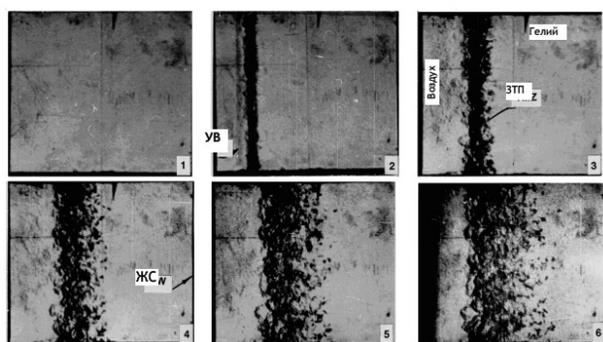


Рис. 14. Развитие зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) на границе воздух — гелий: УВ — ударная волна; ЖС — жесткая стенка

Авторы отмечают, что характер изображения зоны перемешивания в рассеянном свете (рис. 15) существенно отличается от ее изображения, полученного теньвым методом (рис. 14). Характерной особенностью изображения (рис. 15) является наличие достаточно четко выраженной границы между воздухом («тяжелый» газ) и зоной перемешивания, в то же время такая граница между зоной перемешивания и гелием («легкий» газ) не наблюдается. Приведенная на рис. 15 фотография раскрывает механизмы зоны турбулентного перемешивания на сравнительно поздней стадии, когда фрагменты пленки, первоначально разделявшей газы, в основной массе сместили к краю зоны, и их влияние на развитие зоны свелось к минимуму.

С помощью фотометрии в работе [16] были получены данные об изменении концентрации воздуха на границе турбулентного течения (рис. 16).

Методы цифрового анализа также применялись в работе [7], исследование в которой на-

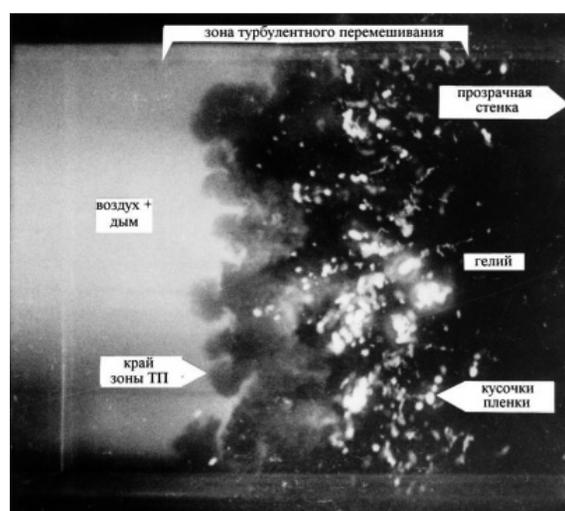


Рис. 15. Фотография зоны турбулентного перемешивания, полученная методом лазерного ножа на границе воздух (с примесью дыма) — гелий на момент времени $t \approx 900$ мкс

правлено на изучение методов цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки. В работе исследовались поля плотности прозрачных сред теньвым фоновым методом (ТФМ) и поля скоростей газоплазменных жидких потоков, полученных с использованием как засевого, так и беззасевого трассирования. В физике и механике жидкости, газа и плазмы цифровые технологии дали возможность получения количественной информации о параметрах потока через компьютерную обработку цифровых изображений. Первоначально для определения смещений частиц в засеянном потоке жидкости

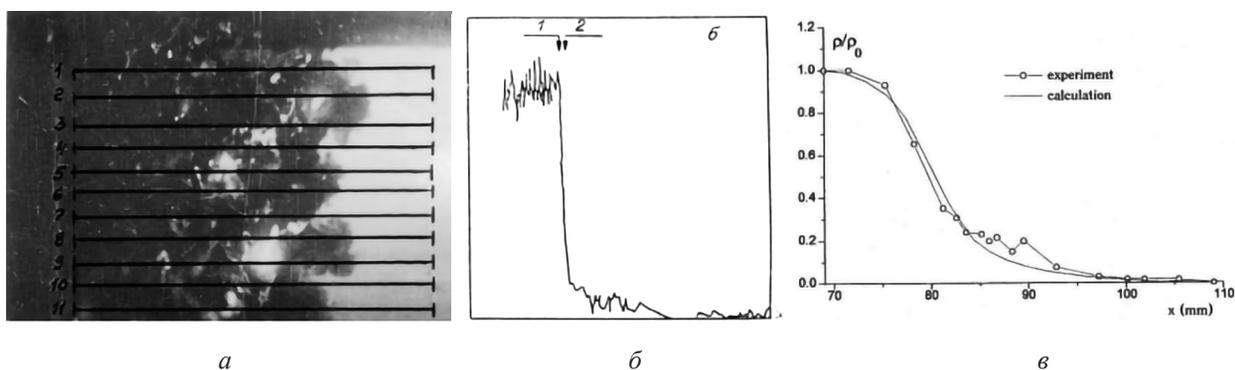


Рис. 16. Фотометрия: а — фрагмент фотографии ($t \approx 800$ мкс), подвергнутой фотометрированию по линиям, нанесенным на фотографии, б — распределение концентрации воздуха по результатам фотометрирования фотографии по линии № 5 (после обработки), в — усредненное распределение концентрации воздуха в зоне турбулентного перемешивания на границе воздух — гелий. Сравнение с расчетом

или газа широко использовался базовый кросс-корреляционный алгоритм. Пример обработки кросс-корреляционным алгоритмом газоплазменного течения с разрывами представлен на рис. 17, *а, б*, а метод цифрового трассирования — на рис. 18, *а–в*.

Обобщая рассмотренные работы, можно сказать, что основными методами регистрации данных при различных исследованиях являются:

1. Высокоскоростная фотографическая съемка. Газодинамический процесс можно сфотографировать либо благодаря собственному свечению газа, нагретого до высокой температуры, либо в свете постоянного источника. Также широко применяется метод фоторазвертки, благодаря которому можно определить скорость движения скачков уплотнения;

2. Измерение плотности. Для измерения распределения плотности газа при ударно-волновых процессах в основном применяется интерференционный метод, шпирен-метод и теневой. В слабых УВ возможно зарегистрировать изменение плотности по отражению света от поверхности фронта. Распределение плотности также можно измерить по рассеянию электронного пучка, по поглощению рентгеновских лучей;

3. Измерение концентрации компонент газа. В случае когда в неравновесном слое за скачком уплотнения протекает диссоциация молекул или химическая реакция, можно следить за изменением концентрации определенных частиц. Это возможно если частицы обладают резко выраженным поглощением света;

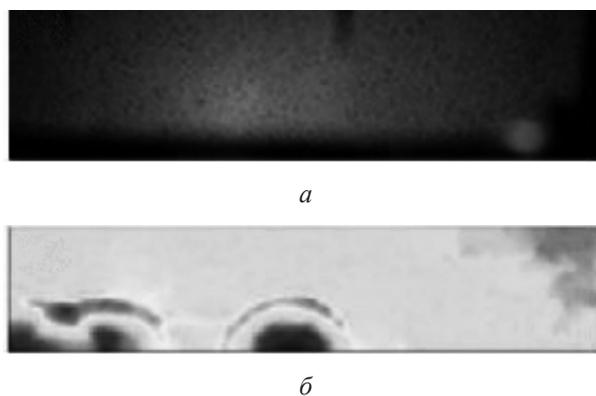


Рис. 17. Теневой фоновый метод. Исходный снимок (*а*) и результат обработки (*б*) поля течения, индуцированного импульсными поверхностными разрядами

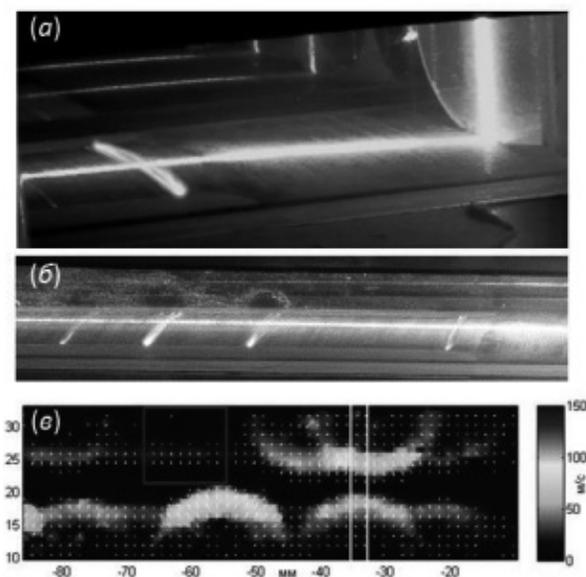


Рис. 18. Метод цифрового трассирования. Вид области регистрации (*а–б*) и результат обработки (*в*) поля течения через 21 мкс после инициирования импульсных поверхностных разрядов

4. Измерение испускания и поглощения света. Подобное изучение возможно производить спектральными измерениями интенсивности испускания света газом, нагретым УВ. Зная плотность газа и температуру, можно определить лучеиспускательную способность при разных температурах и в разных участках спектра;

5. Измерение температуры. Для измерения высоких температур чаще всего применяют оптические методы;

6. Измерение концентрации электронов и электропроводности. Для измерения степени ионизации газа и концентрации электронов в УВ часто используют метод зондов Лэнгмюра, метод поглощения и отражения микрорадиоволн;

7. Измерение давления. Для измерения давления используют пьезоэлектрические датчики с чувствительным элементом из титаната бария;

8. Измерение скорости фронта УВ. Проще всего измерять скорость, регистрируя тем или иным методом моменты прохождения УВ определенных сечений в трубе, отстоящих друг от друга на известных расстояниях. Для регистрации используются пьезодатчики давления, ионизационные датчики, различные электроконтактные датчики и пр. Очень большие скорости принято измерять при помощи фоторазвертки.

Ударно-волновые процессы — быстропротекающие процессы с высокими перепадами температур и давлений, по этой причине невозможно создание универсальной программы для обработки полученных данных и для каждого эксперимента требуется создание уникальной программы, учитывающей особенности протекающих процессов.

Выводы

Разнообразие конструкций ударных труб дает возможность исследовать УВ различной формы, интенсивности и прочих параметров в лабораторных условиях. Описанные фундаментальные исследования показывают, что ударные трубы широко применяются в различных областях науки и техники, включая аэродинамику, физику плазмы, физику горения и взрыва, химическую кинетику и материаловедение. Они используются для исследования процессов, происходящих в гиперзвуковых потоках, таких как нагрев, обтекание тел и взаимодействие УВ с различными препятствиями. Обобщая все перечисленное, можно утверждать, что ударные трубы — универсальный инструмент изучения ударно-волновых процессов.

Список источников

1. Сильников М.В., Гельфанд Б.Е. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон, 2002. 272 с.
2. Гейдон А., Герл И. Ударная труба в химической физике высоких температур / пер. с англ. М.: Мир, 1966. 428 с.
3. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Экспериментальное исследование излучения ударно-нагретого воздуха на двухдиафрагменной ударной трубе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. № 1. С. 1–4.
4. Васильева С.Н., Гук И.В. Создание и эксплуатация газодинамической установки «коническая ударная труба» // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике; сб. тез. и докл. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. С. 568–569.
5. Ударные трубы: сборник [переводных] статей; под ред. Х.А. Рахматуллина и С.С. Семёнова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 699 с.

6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений: изд. 2-е, доп. М.: Наука, 1966. 688 с.

7. Знаменская И.А., Коротева Е.Ю., Глазырин Ф.Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки // Научная визуализация. 2018. Т. 10. № 4. С. 111–119.

8. Хэншел Б. Использование многодиафрагменной схемы в ударной трубе. В кн.: Ударные трубы. М.: ИЛ, 1962. С. 190–217.

9. Mével, R. & Shepherd, J.E.. (2014). Ignition Delay-Time behind Reflected Shock Waves of Small Hydrocarbons-Nitrous Oxide(-Oxygen) Mixtures. Shock Waves. In press. 10.1007/s00193-014-0509-4.

10. Silnikov M.V., Khomik S.V., Guk I.V. et al. Simulation of Interaction between a Spherical Shock Wave and a Layer of Granular Material in a Conical Shock Tube // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2021. Vol. 15. No 4. Pp. 685–690.

11. Сильников М.В., Хомик С.В., Иванцов А.Н. Ослабление сферической ударной волны перфорированной перегородкой в конической ударной трубе // Химическая физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 88–82.

12. Saxena, Saumitra et al. A shock tube study of ignition delay in the combustion of ethylene. Combustion and Flame 158, 2011. Pp. 1019–1031.

13. Попов П.А., Сахаров В.А., Лапушкина Т.А. и др. Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте на ударных трубах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22. № 3. С. 31–41.

14. Козлов П.В., Романенко Ю.В. Ударная труба института механики МГУ для исследования радиационных процессов в высокотемпературных газовых потоках // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14. № 4. С. 1–5.

15. Боровой В.Я., Скуратов А.С., Столяров Е.П. Пульсации давления в сверхзвуковых аэродинамических трубах кратковременного и длительного действия // Ученые записки ЦАГИ. 2001. № 3–4. С. 1–14.

16. Мешков Е.Е. Применение различных методов визуализации при исследовании турбулентного перемешивания в экспериментах на ударных трубах / Доклад на 15-й Международный симпозиум по визуализации течений

(ISFV15). СарФТИ НИЯУ МИФИ. Минск, Беларусь, 25–28 июня 2012 г. 11 с.

Referenses

1. Silnikov M.V., Gelfand B.E. High explosive effects of explosions. SPb.: Polygon, 2002. 272 p.
2. Heydon A., Gerl I. Shock tube in the chemical physics of high temperatures: trans. from English. M.: Mir, 1966. 428 p.
3. Kozlov P. V., Romanenko Yu. V. Experimental study of radiation of shock-heated air on a two-diaphragm shock tube // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2011. Vol. 11. № 1. Pp. 1–4.
4. Vasilyeva S.N., Guk I.V. Creation and operation of the gas-dynamic installation «conical shock tube» // XIII All-Russian Congress on theoretical and applied Mechanics: Collection of abstracts. In 4 vol., St. Petersburg, August 21–25, 2023. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2023. Pp. 568–569.
5. Percussion pipes: Collection of [translated] articles / Ed. [and with an introductory article] by H.A. Rakhmatullina and S.S. Semenov. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1962. 699 p.
6. Zeldovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena – ed. the second, augmented. M.: Nauka Publishing House, 1966. 688 p.
7. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Glazyrin F.N. (2018) Methods of digital image analysis of liquid and gas plasma flows based on cross-correlation processing // Scientific visualization, Vol. 10. No 4. Pp. 111–119.
8. Hanshel B. The use of a multi-fragment circuit in a shock tube. In the book: Percussion pipes. M.: IL, 1962. Pp. 190–217.
9. Mével, R. & Shepherd, J.E. (2014). Ignition Delay-Time behind Reflected Shock Waves of Small Hydrocarbons-Nitrous Oxide(-Oxygen) Mixtures. Shock Waves. In press. 10.1007/s00193-014-0509-4.
10. Silnikov M.V., Khomik S.V., Guk I.V. et al. Simulation of Interaction between a Spherical Shock Wave and a Layer of Granular Material in a Conical Shock Tube // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2021. Vol. 15. No 4. Pp. 685–690.
11. Silnikov M.V., Khomik S.V., Ivantsov A.N. et al. Attenuation of a spherical shock wave by a perforated partition in a conical shock tube // Chemical Physics, 2022. Vol. 41. No 8. Pp. 88–82.
12. Saxena, Saumitra et al. A shock tube study of ignition delay in the combustion of ethylene. Combustion and Flame 158. 2011. Pp. 1019–1031.
13. Popov P.A., Sakharov V.A., Lapushkina T.A. et al. Measurement of heat fluxes by sensors on anisotropic thermoelements in a gas-dynamic experiment on impact pipes // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2021. Vol. 22. No 3. Pp. 31–41.
14. Kozlov P.V., Romanenko Yu.V. Shock tube of the Institute of Mechanics of Moscow State University for the study of radiation processes in high-temperature gas flows // Physico-chemical kinetics in gas dynamics. 2013. Vol. 14. No 4. Pp. 1–5.
15. Borovoy V.Ya., Skuratov A.S., Stolyarov E.P. Pressure pulsations in supersonic wind tunnels of short-term and long-term action // Scientific notes of TsAGI. 2001. No. 3–4. Pp. 3–14.
16. Meshkov E.E.. The use of various visualization methods in the study of turbulent mixing in experiments on impact pipes. Report to the 15th International Symposium on Flow Visualization (ISFV15). SarFTI NIYAU MEFPI. Minsk, Belarus, June 25–28, 2012. 11 p.