

УДК 533.6.071.8

© 1993 г. Н. А. АНФИМОВ, И. В. ЕРШОВ, Е. И. РУЗАВИН,
С. С. СЕМЕНОВ, С. К. ШИМАРЕВ

О СТРУКТУРЕ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ В КРУПНОМАСШТАБНОЙ МНОГОДИАФРАГМЕННОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

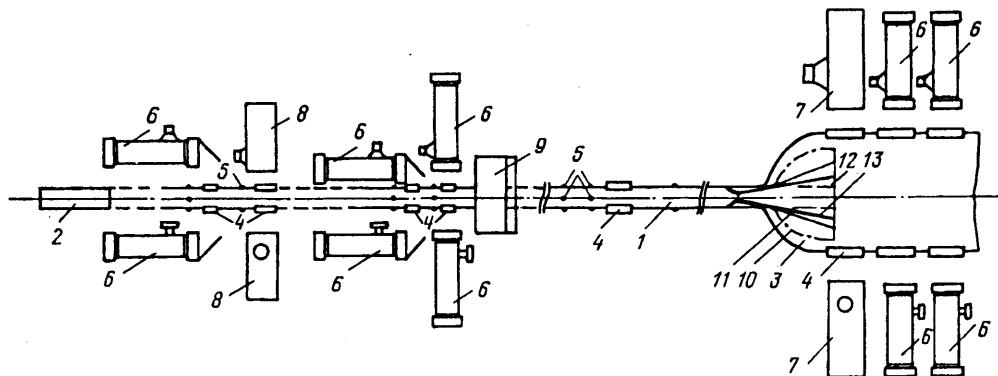
Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований структуры ударной волны и течения газа за ней, данные по времени существования высокотемпературных рабочих потоков, контактных зон и областей равномерных параметров холодного потока в одно- и многодиафрагменных схемах крупномасштабной (канал — диаметр 0,5 м, длина ~200 м и газгольдер — диаметр ~3 м, длина 23 м), снабженной сопловыми вставками ударной трубы Центрального научно-исследовательского института машиностроения.

Использование ударных труб для моделирования гиперзвуковых течений и исследования аэрофизических процессов, сопровождающих движение в атмосфере Земли и других планет летательных аппаратов и метеоритных тел, является весьма актуальной научной проблемой. Для проведения гиперзвуковых аэродинамических и аэрофизических исследований наибольшую перспективу имеют крупномасштабные ударные трубы, в которых можно получать длительные квазистационарные течения высокотемпературного газа, продолжительность которых достаточна для проведения оптико-физических, тепловых и весовых измерений на моделях крылатых летательных аппаратов субнатурных размеров. Однако до сих пор имеется мало данных о структуре течений в многодиафрагменных ударных трубах, использующих сопловые секции для увеличения чисел Маха и Рейнольдса в расширяющихся потоках высокоэнталпийного газа, имеющих очень высокие давления и температуры торможения.

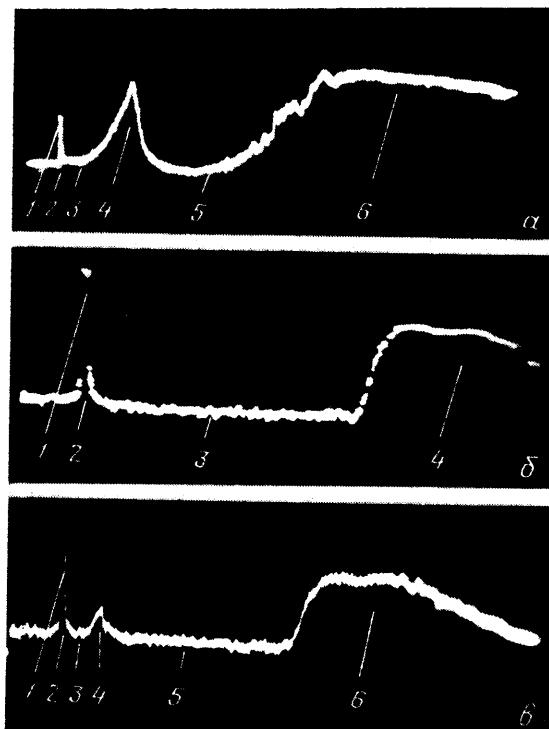
Обеспечение формирования квазистационарного обтекания носовой, межступенчатой и кормовой частей многоступенчатого летательного аппарата является сложной научной и технической проблемой, решение которой может быть достигнуто благодаря специальному выбору начальных давлений и состава толкающих и рабочих газов, мест расположения диафрагм, сопловых вставок, сужений и расширений ударной трубы, а также размеров критических сечений сопел. Кроме того, необходимо применение специально разработанных конструкций оптической, спектроскопической и фотоэлектрической аппаратуры, малоинерционных датчиков и весовых измерительных систем, синхронизированных с запуском ударной трубы и включением регистрирующей аппаратуры, комплексом автоматизированной обработки результатов.

В настоящей работе представлены результаты изучения структуры течения в крупномасштабной многодиафрагменной ударной трубе при различных режимах и схемах ее работы: определение формы и структуры фронта ударной волны, оценка качества и продолжительности рабочих потоков, измерение параметров ударной волны и т. д., необходимых для применения крупномасштабных ударных труб для гиперзвуковых аэродинамических и аэрофизических исследований.

На установке проведены также исследования взаимодействия ударных волн с различными моделями (конструкциями космических и летательных аппаратов,



Фиг. 1



Фиг. 2

их составных частей и блочных компоновок, элементами наземных сооружений и т. д.), получены данные по фундаментальным физико-химическим свойствам воздуха при высоких температурах и давлениях (коэффициенты рефракции воздуха и его компонентов, константы скорости реакций диссоциации и ионизации, протяженность зон неравновесных процессов за ударной волной при высоких температурах и различных давлениях) и др. [1—4].

Несколько позднее появились сообщения о создании крупномасштабных ударных труб такого же или большего диаметра [7—10 и др.]. Тем не менее по основным параметрам моделирования натурных условий, сопровождающих движение летательных аппаратов, описываемая ударная труба и в настоящее время обеспечивает проведение актуальных и перспективных исследований.

Схема установки и используемой аппаратуры представлена на фиг. 1. Конструкция трубы включает камеру низкого давления — канал 1, камеру высокого давления 2 и газгольдер — большую рабочую часть 3, сопла профилированное 10, коническое 11, цилиндрический отсек 12 и сопло 13 со сменными критическими сечениями. На фиг. 1 представлены также защитные стекла, оптические глазки 4, датчики давления и скорости 5, теневые приборы ИАБ-451 — 6, ТЕ-20 — 7, ТЕ-19 — 8, интерферометр ИЗК-454 — 9. Диаметр трубы 0,5 м, длина камеры высокого давления 2—120 м, канала 40—180 м. Соответствующие размеры газгольдера: диаметр 3,2 м, длина 23 м, объем 180 м³. Рабочее давление толкающего газа ≤ 200 атм, исследуемого 10⁻² мм рт. ст.— 50 атм в канале; 10⁻² мм рт. ст.— 7 атм в газгольдере. Труба в газгольдере заканчивается профилированным с диаметром на выходе 3 м соплом, либо коническим 15- и 8-градусным соплами или цилиндрическим отсеком. Диаметр критического сечения восьмиградусного сопла 52—500, а выходного сечения 960—1400 мм. Это позволяет получать сверхзвуковые потоки в широком диапазоне чисел Маха (2—20). Узлы смены диафрагм позволяют монтировать металлические диски и диафрагмы с калиброванными насечками, а также пленочные диафрагмы. Раскрытие диафрагмы осуществляется либо принудительным способом при помощи электропневматического устройства гарпунного типа, либо путем повышения давления толкающего газа до расчетной величины разрыва диафрагмы.

В составе ударной трубы имеется четыре рабочие части, три из которых расположены в цилиндрической части канала и одна — в газгольдере. Первая часть представляет собой отсек метровой длины, в котором предусмотрены люки для монтажа модели и двойные оптические защитные стекла диаметром 150 мм. Вторая и третья — конструктивно подобны и расположены на расстояниях от торца камеры 140 и 165 м соответственно. Они также имеют люки для монтажа моделей и набор боковых съемных крышек, в которых предусмотрена установка прямоугольных (220×150 мм) или круглых (диаметром 150 мм) оптических защитных стекол. Имеется набор державок с траверсами для крепления моделей. Максимальный диаметр используемых здесь моделей равен 100 мм.

В газгольдере за срезом сопла располагаются три горизонтальных ряда стекол в каждом ряду на расстоянии 524 мм друг от друга. Диаметр стекол 360 мм. Установка позволяет испытывать модели больших размеров, близких к натурных, а также натурные фрагменты космических аппаратов (диаметр модели модели до 0,8 м; длина модели до 3 м). Модели могут устанавливаться под различными углами атаки в различных точках поля течения. Для исследования поля потока имеется также набор насадок — «гребенка», на которой могут быть установлены датчики полного давления, зонды и т. п.

В качестве исследуемых газов использовались воздух, кислород, азот, аргон, углекислый газ и др. В качестве толкающих газов применялись водород, гелий, воздух или азот. Высокие параметры исследуемого газа обеспечивались с помощью кислородо-водородных взрывчатых смесей с добавками гелия, азота и других газов. Инициирование взрыва осуществлялось специальной системой, включающей электродетонаторы и высоковольтные искровые разряды. Кроме того, для этой цели эффективным оказалось использование схемы, в которой смеси сжимаются и подрываются ударной волной.

Управление системами газоснабжения, вакуумирования, электропитания, измерения и технологическим оборудованием, контроль выполнения операций по подготовке и проведению экспериментов осуществляются дистанционно с центрального пульта.

Для измерения скорости ударной волны используются пьезоэлектрические или ионизационные датчики-отметчики, расположенные по длине трубы на заданных расстояниях друг от друга, сигналы от датчиков, после формирования с помощью специальных электронных приставок, поступают в измеритель интервалов времени.

Давление в зависимости от его величины, длительности рабочего потока и требуемого разрешения во времени измеряется пьезоэлектрическими или индуктивными датчиками, сигналы от которых поступают на цифровые запоминающие электронно-лучевые осциллографы и самописцы.

Весовые измерения на моделях проводятся с помощью многокомпонентных пьезо- и тензометров, разработанных и изготовленных в ЦНИИМАШ.

Труба оснащена также аппаратурой диагностики плазмы и радиофизическими средствами измерений параметров потока (СВЧ-аппаратурой для непрерывного измерения скорости ударной волны вдоль всего канала, продолжительности рабочего потока; измерителями комплексного коэффициента прохождения радиоволн: радиоинтерферометр, рефлектометр и др.).

Оптико-физические исследования осуществлялись с помощью теневых приборов ИАБ-451, ТЕ-19, ТЕ-20, интерферометра ИЗК-454 и интерференционно-теневого прибора ИЗК-463. Применялись

теневой фотоэлектрический метод, покадровая съемка, высокоскоростная кинорегистрация и фоторазвертка [2, 4].

Основные параметры работы ударной трубы — давление и скорость ударной волны — измеряются в каждом эксперименте. Характер распределения скорости ударной волны по длине трубы находится в хорошем соответствии с расчетными данными [11, 12].

Первым этапом работы было исследование структуры ударной волны в канале ударной трубы. На фиг. 2 представлены осцилограммы процесса прохождения ударной волны в канале ударной трубы в воздухе, полученные с помощью теневого фотоэлектрического метода [2]. Амплитуда сигнала на осцилограмме в каждый момент времени пропорциональна градиенту показателя преломления в соответствующей точке потока. Резкое возрастание градиента показателя преломления в начальный момент времени соответствует фронту ударной волны 1, затем следует область неравновесных процессов 2, далее первая рабочая пробка 3, контактная поверхность 4, вторая рабочая пробка 5 и область равномерных параметров толкающего газа 6.

Кинотенеграммы процесса распространения ударной волны в канале ударной трубы при $p \geq 0,1$ мм рт. ст. показывают, что фронт ударной волны на расстоянии, большем 60 калибров трубы, плоский, на меньшем расстоянии вблизи диафрагмы за фронтом наблюдаются пересекающиеся скачки уплотнения, образующиеся вследствие регулярного и маховского отражения волн от стенок ударной трубы. При определенных условиях наклонные ветви маховского отражения образуют систему поперечных волн, следующих за первичной ударной волной [5].

Для проведения аэродинамических и аэрофизических исследований в ударных трубах важнейшими характеристиками являются продолжительность и качество рабочего потока, его равномерность. В реальных трубах вследствие наличия пограничного слоя продолжительность рабочего потока меняется по длине трубы и течение за ударной волной может быть неоднородным. Хотя изучению рабочего потока посвящено много работ [5—9, 11, 12], вопрос этот до настоящего времени остается открытым.

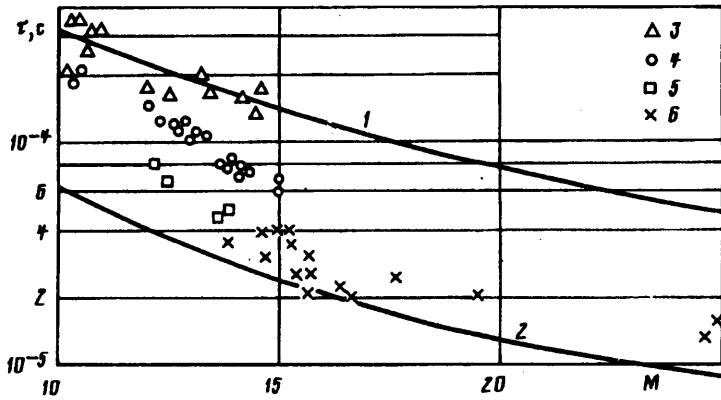
Влияние пограничного слоя на продолжительность рабочего потока рассмотрено в [12]. Для оценки наибольшего расстояния между ударной волной и контактной поверхностью получено выражение

$$\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^n \left(\frac{l_m}{d}\right)^{1-n} = \frac{1}{4\beta} \left(\frac{p_1}{p_0} \frac{W}{W-1}\right)^{1-n} M \left(\frac{\rho a}{\mu}\right)_0^n$$

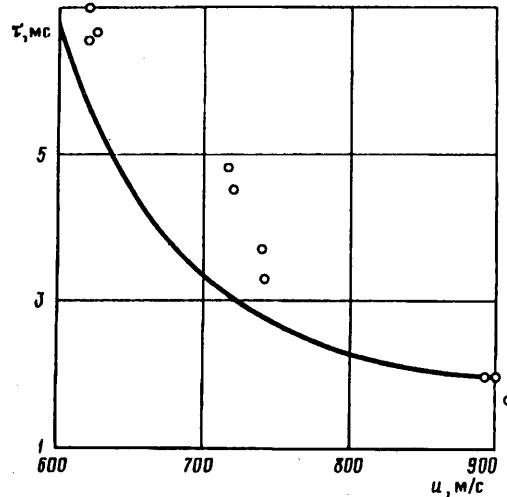
Здесь $W = u/v$, u — скорость ударной волны, M — число Маха, v — скорость частиц газа за ударной волной, p_1 — начальное давление рабочего газа, p , ρ , μ с индексом «ноль» — давление, плотность и вязкость газа при нормальных условиях, $\beta = \text{const}$ — согласующий параметр, a — скорость звука. Параметр $n = 1/2$ для ламинарного и $1/5$ — для турбулентного пограничного слоя.

Для воздуха и аргона критерий применимости теории ламинарного и турбулентного пограничных слоев для определения максимального рабочего времени при $3 \leq M \leq 8$: $dp_1 \leq 1,25$ для ламинарного и $dp_1 \geq 12,5$ для турбулентного. Здесь диаметр трубы d выражен в см, а p_1 — в см рт. ст. В случае турбулентного пограничного слоя при $dp_1 \geq 12,5$ продолжительность рабочего потока для воздуха и аргона составляет $\sim 0,5\text{--}0,1$ от идеального значения при $L/d = 45\text{--}100$, где L — расстояние от диафрагмы до сечения, в котором проводятся измерения.

Эти данные дают верхний предел рабочего времени. Дополнительно необходимо учитывать немгновенность разрыва диафрагмы, которая вызывает перемешивание на границах раздела рабочего и толкающего газов, создает неидеальное течение вблизи диафрагмы и неоднородность течения между ударной волной и контактной поверхностью. Следует также иметь в виду, что основная проверка правильности учета всех факторов, влияющих на продолжительность рабочего потока, была



Фиг. 3



Фиг. 4

выполнена в ударных трубах малого диаметра и на отдельных режимах работы установки.

Исследования в крупномасштабной ударной трубе проводились в сечениях, расположенных на расстояниях 70, 140 и 200 калибров от диафрагмы, где длина рабочей пробки приближалась к максимальной.

Анализ полученных данных показывает, что на большинстве режимов можно получить достаточно продолжительный горячий и холодный равномерный поток рабочего газа (градиент показателя преломления близок к нулю). На фиг. 2, а и б представлены осциллограммы процессов распространения ударной волны при однодиафрагменной схеме работы ударной трубы, на фиг. 2, в — при двухдиафрагменной. Осциллограмма на фиг. 2, а получена при использовании в качестве толкающего газа воздуха (давление 140 атм). При этом начальное давление в канале составляло $p_1 = 0,1$ мм рт. ст. Скорость ударной волны $u = 3000$ м/с. Общая длительность развертки 2,5 мс. Продолжительность горячего рабочего потока на этом режиме составила 140 мкс. При $p_1 = 1$ мм рт. ст. и скорости ударной волны 3200 м/с продолжительность горячего рабочего потока значительно больше (фиг. 2, б) и составила ~1 мс. Поток равномерный. При больших числах M_1 и малых давлениях в рабочей части установки равномерный поток весьма кратковременный. Однако зона неравновесных процессов выделяется четко. По-

d_s , мм	$d_s = 52,5$ мм			86,94 мм			156,22 мм		
	T_s , К	M_s	Re_s , м ⁻¹	T_s , К	M_s	Re_s , м ⁻¹	T_s , К	M_s	Re_s , м ⁻¹
958,1	300	7,8	$5 \cdot 10^6$	350	6,2	$6 \cdot 10^6$	680	4,8	$2 \cdot 10^7$
1105,4	250	8,35	$4 \cdot 10^6$	300	6,65	$5 \cdot 10^6$	600	5,1	$2 \cdot 10^7$
1252,7	220	8,8	$3 \cdot 10^6$	260	7,0	$3 \cdot 10^6$	550	5,4	$1,5 \cdot 10^7$
1400,0	200	9,25	$3 \cdot 10^6$	230	7,35	$3 \cdot 10^6$	500	5,7	$1 \cdot 10^7$

этому такие режимы использовались для проведения аэрофизических исследований.

График зависимости продолжительности рабочего потока τ от числа Маха M_s ударной волны в диапазоне $10 \leq M_s \leq 25$ для двух режимов ($p_1 = 0,01$ и $0,06$ мм рт. ст.— ламинарный пограничный слой) представлен на фиг. 3. На этом же графике нанесены данные [12] — 1 для $p_1 = 0,06$ мм рт. ст., 2 для $p_1 = 0,01$ мм рт. ст., а также результаты определения τ , полученные с помощью зондового метода — 3 и 5 и теневого фотоэлектрического 4 и 6 — соответственно для режимов с $p_1 = 0,06$ и $0,01$ мм рт. ст. Видно, что при $p_1 = 0,06$ мм рт. ст. экспериментальные данные 4 существенно меньше данных [12]. Данные, полученные с помощью зондового метода, близки к [12]. Однако следует иметь в виду, что зондовый метод дает завышенные значения продолжительности рабочего потока. Это объясняется тем, что с его помощью регистрируется суммарная величина продолжительности рабочего потока и контактной области.

При $p_1 = 0,01$ мм рт. ст. кривая из работы [12] проходит ниже точек, полученных с помощью обоих методов. Это можно объяснить тем, что при таких значениях рабочего давления на формирование рабочей пробки существенно начинают влиять эффекты перемешивания газов в контактной области.

В целом эксперименты показали, что расчетные данные [12] могут быть использованы для определения продолжительности рабочего потока. Однако в исследуемом диапазоне M значения β не постоянны и в 1,2—1,5 раза больше по сравнению со значениями, приведенными в [12].

При $p_1 \geq 10$ мм рт. ст. продолжительность рабочего потока рассчитывается по теории турбулентного пограничного слоя. Данные по продолжительности рабочего потока в диапазоне $u \approx 600$ — 900 м/с при $p_1 = 37$ — 200 мм рт. ст. в сравнении с теоретическими данными представлены на фиг. 4. Здесь теоретические и экспериментальные данные согласуются более удовлетворительно.

Измерения τ в различных сечениях ударной трубы показали, что ближе к диафрагме существенное влияние на продолжительность рабочего потока оказывает немгновенность раскрытия диафрагмы. Сказываются также процессы перемешивания рабочего и толкающего газов и горение толкающего газа (водорода) в воздушной среде.

Для получения ударных волн используются также двух- и трехдиафрагменные схемы, что обеспечивает широкий диапазон скорости волн от практически звуковой до 10000 м/с, и получение второй (холодной) рабочей пробки с высоким числом M . При двухдиафрагменной схеме работы ударной трубы возможно получение продолжительного равномерного высокомахового холодного потока (фиг. 2, 6). Здесь при давлении исследуемого газа $p_1 = 0,02$ мм рт. ст. и скорости ударной волны $u = 4880$ м/с продолжительность горячего потока составила 50 мкс, холодного — 320 мкс. При этом в камере высокого давления использовался водород (давление 81 атм), в среднем отсеке — воздух (давление 400 мм рт. ст.).

На режиме $p_1 = 1$ мм рт. ст., $u = 4500$ м/с на расстоянии $L = 70$ м продолжительность первой рабочей пробки $\tau_1 = 50$ мкс, второй $\tau_2 = 800$ мкс, при $L = 110$ м соответственно 120 и 1500 мкс, продолжительность контактной области $\tau_k \approx 50$

мкс. Приращение плотности в первой рабочей пробке составляет $9 \cdot 10^4$ кг/м³, во второй 10^2 кг/м³. Эти результаты удовлетворительно согласуются с теоретическими [11].

Была оценена протяженность контактной области. Она размыта и имеет значительные размеры — от нескольких мкс до мс с пологими «крыльями» и максимальным значением показателя преломления приблизительно в середине. При низких, даже близких между собой режимах наблюдается значительный разброс в значениях τ_k : при $p_4/p_1 = 1,39—2,53$, где p_4 — давление толкающего газа, $\tau_k = 30—200$ мкс. Характер распределения градиента показателя преломления в этой зоне, ее протяженность, вероятно, зависят от процессов раскрытия диафрагмы и перемешивания рабочего и толкающего газов.

Проведенные исследования структуры ударной волны за срезом цилиндрической вставки в большой рабочей части ударной трубы показали, что имеет место типичный дифракционный процесс: ударная волна, за первой ударной волной в результате ее дифракции при расширении происходит образование вторичной ударной волны и контактной поверхности. В дальнейшем обе волны вместе с контактной поверхностью сносятся вниз по потоку. Имеется обширная область равномерных параметров рабочего газа, ограниченных конусом Маха, что позволяет проводить аэродинамические исследования обтекания различных видов моделей. Наличие достаточно большого количества оптических стекол дает возможность в одном сечении не только исследовать картину обтекания моделей, но и осуществлять контроль параметров потока. Можно также успешно проводить исследования взаимодействия дополнительно создаваемых ударных волн, влияние различных факторов внешнего воздействия на модель при обтекании ее потоком.

Сверхзвуковые потоки получают с помощью как конического, так и профилированных сопел, устанавливаемых в торце камеры низкого давления. Использование сменных критических вставок и дополнительных секций в конце сопла позволяют получить сверхзвуковые потоки в широком диапазоне чисел Маха. В таблице представлены расчетные параметры рабочего потока для конического сопла крупномасштабной ударной трубы при постоянном давлении за отраженной волной, $p_o = 100$ ата, $T_o = 3000$ К (схема водород — воздух). В этой таблице индексом a обозначены параметры потока на срезе сопла, a — диаметр критического сечения.

Экспериментальная отладка режимов работы ударной трубы с отражающим соплом показала, что получаемые на ней сверхзвуковые потоки имеют длительность ($\tau = 150—170$ мс при $M = 6,3$ и $\tau = 60—80$ мс при $M = 10$), достаточную для проведения весовых измерений на модели в большой рабочей части установки.

Широкие возможности получения в крупномасштабной ударной трубе ЦНИИМАШ ударных волн и, как следствие, нагреваемых до большой температуры объемов газа, а также сверхзвуковых потоков позволяют провести на ней разнообразные исследования, которые нашли отражение в ряде фундаментальных работ [13—14].

Результаты проведенных исследований были использованы при создании ракет-носителей «Восток», «Протон», спускаемых аппаратов «Союз», посадочных модулей «Луна», «Венера», «Марс», а также комплекса «Энергия-Буран».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов С. С. Метод проверки уравнения состояния газов при высокой температуре//Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. № 4. С. 841—843.
2. Васильев Л. А., Галанин А. Г., Ершов И. В., Сунцов Г. Н. Фотоэлектрический теневой метод исследования нестационарных процессов//Приборы и техника эксперимента. 1964. № 3. С. 195—199.
3. Васильев Л. А., Ершов И. В., Семенов С. С. Экспериментальное исследование неравновесных процессов за ударной волной в воздухе и азоте теневым методом//Докл. АН СССР. 1969. Т. 186. № 5. С. 1041—1044.

4. Ершов И. В., Овечкин А. П., Федюшин Б. Т. и др. Применение импульсных оптических квантовых генераторов (о. к. г.) в качестве источников света к теневым и интерференционным приборам//Докл. АН СССР. 1969. Т. 189. № 2. С. 277—280.
5. Ударные трубы/Сб. ст. под ред. Рахматуллина Х. А. и Семенова С. С. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 699 с.
6. Основные результаты экспериментов на ударных трубах/Под ред. А. Ферри. М.: Госатомиздат, 1963. 442 с.
7. Hypersonic flow research/Ed. F. R. Riddel. N. Y., L.: Acad. Press, 1961. 758 р. (Рус. перев.: Исследование гиперзвуковых течений/Сб. ст. под ред. В. С. Авдуевского и П. Н. Широкова. М.: Мир, 1964. 544 с.)
8. Holden M. S. A review of aerothermal problems associated with hypersonic flight. N. Y., 1986. 40 р.
9. Забелинский И. Е., Набоко И. М., Тарабенко М. В., Шаталов О. П. Искажение фронта ударной волны в ударной трубе с расширяющимся коническим переходником//Изв. АН СССР. МЖГ. 1991. № 4. С. 141—147.
10. Mead K. F., Uppard I. E. The 30×18 in shock tube//Atomic weapons research establishment. Rep. 1965. № 059/65. 21 р.
11. Дунцова Ж. С., Ершов И. В., Киреев В. Т., Рузавин Е. И. Расчет движения ударной волны и параметров потока при немгновенном открытии диафрагмы в ударной трубе//Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 2. С. 120—128.
12. Mirels H. Shock tube time limitation due to turbulent-wall boundary layer//AIAA Journal. 1964. V. 2. № 1. P. 84—93.
13. Ступченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965. 484 с.
14. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.

Москва

Поступила в редакцию
5.XI.1991