

## Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института

© В.Г. Масленников, В.А. Сахаров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 27 мая 1996 г.)

Приводятся результаты численного расчета течения в двухдиафрагменной ударной трубе в режиме сшитой контактной поверхности. Расчет выполнен в рамках модели идеальной ударной трубы с учетом реальных свойств толкающего газа при больших давлениях и равновесной термодинамики процессов за ударными волнами при изменении значения числа Маха ударной волны в рабочем газе  $M_{s1}$  в диапазоне 5–25. На двухдиафрагменной ударной трубе Физико-технического института были реализованы режимы течения со сшитой контактной поверхностью для значений числа  $M_{s1} = 6.3, 11$  и  $15$ . Постоянство параметров рабочего газа при этом сохранялось в течение более 1 ms. Проведено сравнение данных расчета с экспериментом и показано, что расчетные данные могут быть использованы для определения длин отсеков двухдиафрагменной ударной трубы и оценки ее рабочего времени. Расчетные значения начального давления в отсеках трубы существенно меньше реализуемых в эксперименте. Вдоль оси конического сопла проведены измерения статического давления при расширении в нем водорода (температура торможения  $T_0 = 293$  К) и ударно нагретого азота ( $T_0 = 4000$  К). Показано, что при расширении водорода происходит дезактивация вращательных, а в потоке азота частичное замораживание колебательных степеней свободы.

### Введение

Ударные трубы являются достаточно простым и эффективным инструментом для создания и изучения высокосубзвуковых течений газа. Они широко используются при проведении исследований в области аэродинамики, физической газодинамики, физики плазмы, спектроскопии, химической кинетики. По сравнению с другими способами нагрева газа (электрический разряд, взрыв и т.п.) нагрев газа ударными волнами, создаваемыми в ударных трубах, может быть осуществлен в широком диапазоне строго задаваемых и контролируемых начальных условий и химического состава исследуемой среды. Результаты измерений могут быть сопоставлены с данными расчета в одномерной постановке.

### Конструкция установки и средства диагностики

В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе создана диафрагменная ударная труба, рассчитанная на получение и исследование ударных волн большой интенсивности. Ударная труба внутренним диаметром 100 mm и общей длиной 16 m имеет камеру высокого давления длиной 3 m, снабженную внешним омическим нагревателем. Камера изготовлена из специальной водородостойкой стали и по своим прочностным свойствам позволяет использовать в качестве толкающего газа водород при температуре до 750 K и давлении до 15 МПа. Диафрагменный блок, отделяющий при помощи одной или двух диафрагм канал высокого давления от канала низкого давления, позволяет запустить установку при заданном перепаде давления. Другой конец трубы выходит в ресивер емкостью 6 m<sup>3</sup>, позволяющий в случае необходимости подключить дополнительный объем 20 m<sup>3</sup>.

Канал ударной трубы может быть разделен диафрагмой в нескольких сечениях, что позволяет изменять соотношение длин ее отсеков, а также реализовать двухдиафрагменный режим работы ударной трубы. Разделение ударной трубы на секции и их герметизация осуществляется при помощи металлических или пластиковых диафрагм, удерживаемых при помощи гидравлических прессов. Каждая секция может быть откачена вакуумным насосом до остаточного давления 1 Pa. В торце трубы, выходящем в ресивер, располагается сопловой блок, конструкция которого позволяет размещать диафрагму на входе в сопло и производить истечение рабочего газа в пространство, заполненное газом другого сорта.

Экспериментальная установка оснащена поляризационным интерферометром сдвига, изготовленным на базе серийного оптического прибора ИАБ-451. Размер поля зрения интерферометра 220 mm, величина сдвига 50 mm. В качестве источника света используется твердотельный лазер с модулированной добротностью ОГМ-20, обладающий достаточной мощностью излучения и малым (около 30 ns) временем свечения. Это позволяет получать интерферограммы объекта в масштабе 1 : 1 для исследования газодинамической структуры течения. Для получения кинематических характеристик объекта его фоторегистрация осуществляется при помощи ждущей линзы времени ЖЛВ-2 через временные интервалы 3–5  $\mu$ s. Лазер в этом случае перестраивается в режим свободной генерации светового импульса длительностью 600–800  $\mu$ s.

Кроме оптических методов установка оснащена системой измерения импульсных давлений в различных точках потока. Пьезоэлектрические датчики давления диаметром чувствительного элемента 4 mm имеют коэффициент преобразования 300–600 mV/atm. Скорость ударной волны определяется путем измерения временного

интервала между сигналами двух датчиков, расположенных на известном расстоянии на внутренней поверхности канала ударной трубы. Точность измерения скорости ударной волны не хуже 1%.

## Расчет и экспериментальное исследование оптимальных режимов работы ударной трубы

Существенное ограничение возможностей экспериментальных исследований на ударной трубе связано с малым рабочим временем, т. е. малым временем существования однородных по параметрам состояний высокоэнтальпийного потока газа. Рабочее время установки определяется интервалом между приходом в заданное сечение канала трубы ударной волны и контактной поверхности или другого газодинамического разрыва, например отраженной от торца камеры высокого давления волны разрежения.

Наиболее высокие параметры в ударной трубе реализуются в области отражения ударной волны от заглушенного торца канала низкого давления, где создается заторможенный объем газа с высокой энтальпией. В этом случае рабочее время определяется характером взаимодействия отраженной ударной волны с контактной поверхностью. Если в результате взаимодействия образуется либо волна разрежения, либо ударная волна, нарушающая однородность потока в области отражения, то рабочее время определяется временем прихода к торцу канала того или другого возмущения от момента отражения. Оптимальным является режим, называемый режимом сшитой контактной поверхности, когда в результате взаимодействия не образуется никаких газодинамических разрывов и контактная поверхность останавливается. Рабочее время в этом случае существенно увеличивается и измеряется промежутком времени от момента отражения до прихода отраженной от торца камеры высокого давления волны разрежения.

В исследованиях, связанных, например, с расширением высокотемпературного потока в сверхзвуковом сопле из области за отраженной ударной волной, увеличение рабочего времени за счет создания специальных режимов отражения может стать принципиально важной задачей. Это связано с тем, что время установления квазистационарных условий истечения (стартовый процесс) может оказаться соизмеримым с рабочим временем установки. Так, для диафрагменных ударных труб при числе Маха ударной волны  $M > 10$  это время сокращается до величины порядка сотни микросекунд. Следует заметить, что рабочее время установки не может быть увеличено за счет соответствующего увеличения длины канала ударной трубы, так как диссипативные процессы приводят к уменьшению интенсивности ударной волны при ее движении вдоль канала трубы, а горячий газ, перетекая из области за падающей ударной волной в зону холодного толкающего газа, сокращает длину "пробки" ударно на-

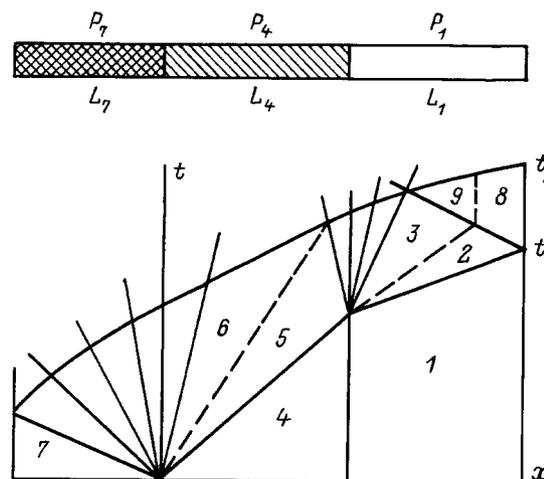


Рис. 1. Схема двухдиафрагменной ударной трубы и  $x-t$ -диаграмма волнового процесса.

гретого газа. Другая особенность таких режимов течения заключается в том, что в однодиафрагменном режиме для заданной комбинации толкающего и рабочего газов и их температуре режим сшитой контактной поверхности реализуется при одном фиксированном значении числа Маха ударной волны. Для осуществления этого режима в более широком диапазоне чисел Маха необходимо либо разбавлять толкающий газ другим газом, с меньшим значением скорости звука, реализуя условия сшивки при меньших значениях числа Маха, либо нагревать его до необходимой для достижения сшивки температуры при больших значениях числа Маха. В установках, рассчитанных на высокие давления толкающего газа, этот нагрев для выполнения условий прочности обыкновенно не превышает 700 К.

Более широкие возможности для осуществления режимов сшивания контактной поверхности обеспечивает двухдиафрагменная схема ударной трубы, в которой ударная волна в исследуемом газе создается ударно нагретым газом из промежуточной камеры. Схема реализации такого режима течения в ударной трубе и соответствующая ей  $x-t$ -диаграмма показаны на рис. 1. Здесь и далее 1, 4 и 7 — начальные параметры в канале ударной трубы, промежуточной камере и камере высокого давления; 2 и 5 — параметры за падающими ударными волнами в рабочем и буферном газах; 3 и 6 — параметры расширенных в нестационарных веерах волн разрежения буферного и основного толкающего газов; 8 и 9 — параметры газа за отраженной ударной волной в рабочем и буферном газах.

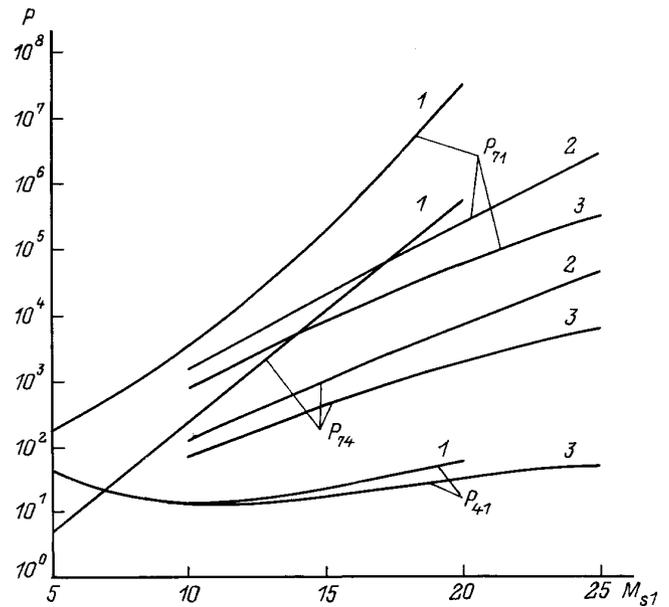
В рамках модели идеальной ударной трубы А.К. Мякишевским был проведен расчет параметров рабочего газа с учетом эффектов сжимаемости толкающего газа при высоких давлениях в камере ударной трубы и равновесной термодинамики процессов за падающей и отраженной ударными волнами. В принятой модели не были учтены такие реально существующие процессы, как: а) наличие

участка установления течения, обусловленного конечностью времени раскрытия диафрагмы, б) затухание ударных волн и изменение размеров "пробки" ударно нагретого газа, вызванные наличием пограничного слоя на стенках трубы, в) неустойчивость контактной поверхности как газодинамического разрыва плотности, г) наличие зоны релаксации в газе за падающей и отраженной ударными волнами, д) взаимодействие отраженной ударной волны с пограничным слоем на стенке трубы. Влияние перечисленных процессов на течение в ударной трубе наблюдалось и анализировалось в условиях эксперимента.

Наиболее выгодной в термодинамическом отношении комбинацией газов в камере высокого давления и промежуточной секции ударной трубы является сочетание водород-гелий. Использование более высокого давления водорода расширяет возможности установки при исследовании расширения газа в гиперзвуковых соплах. Поэтому расчет параметров течения осуществлялся при фиксированном значении давления водорода  $P = 100$  МПа, соответствующем максимально допустимому для этой установки, и трех значениях начальной температуры толкающего газа в камере высокого давления  $T = 298, 473, 723$  К. Число Маха ударной волны в рабочем газе  $M_{s1}$  изменялось в диапазоне 5–25. В качестве рабочих газов рассматривались воздух и аргон.

Состав воздуха предопределяет сложное поведение его параметров при изменении температуры и оказывает соответствующее влияние на течение в ударной трубе. Так, уже при температуре около 2000 К обнаруживается отличие термодинамических свойств воздуха от свойств идеального газа. При определении его параметров был использован метод предствления термодинамических функций, изложенный в [1,2]. В расчете использовались точные значения термодинамических функций воздуха [3–5]. Каждая функция представляется в виде произведения двух величин: приближенного значения, вычисляемого из аналитического выражения и корректирующей функции, дополняющей значение до точной табличной величины. Корректирующая функция разлагается по полиномам Лежандра, что позволяет в силу хорошей сходимости ограничиться шестью членами. Такой способ задания функций позволяет получить табличное значение с точностью до десятых долей процента.

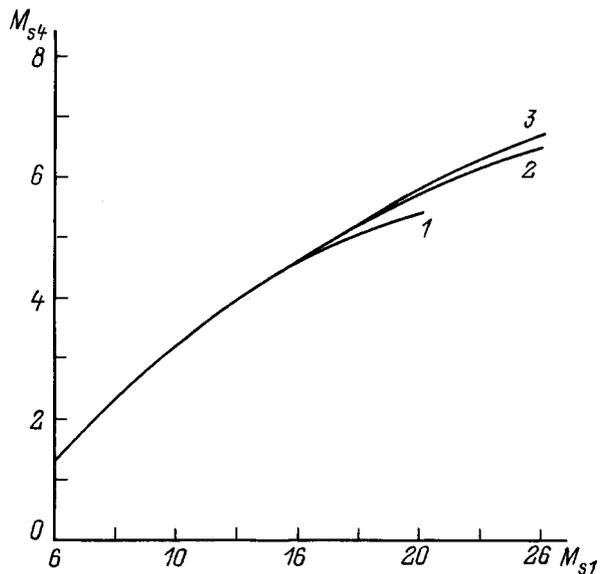
Аргон в качестве рабочего газа был выбран в связи с двумя существенными обстоятельствами. Во-первых, поскольку этот газ дает наиболее заметное изменение параметров газа в "пробке" за счет нарастания пограничного слоя на стенках трубы [6], то при проведении исследований в аргоне наиболее четко должны проявиться эффекты, обусловленные неидеальностью рабочего газа. Во-вторых, в рассматриваемом диапазоне чисел Маха в условиях эксперимента оказывается наиболее просто производить оценку температурных изменений в ионизованном одноатомном газе путем измерения излучения и проводимости газа. Значения термодинамических функций аргона брались из работы [7].



**Рис. 2.** Относительные начальные давления в отсеках ударной трубы в функции  $M_{s1}$ .

Расчет параметров, обеспечивающих сшивание контактной поверхности проводился методом итераций. При заданных значениях температуры  $T_7$  и давления  $P_7$  водорода в камере высокого давления для каждого числа Маха падающей ударной волны  $M_{s1}$  подбирается значение начального давления рабочего газа в канале трубы  $P_1$  и с учетом равновесной термодинамики процессов в воздухе (аргоне) определяются параметры течения в областях за падающей 2 и отраженной 8 ударными волнами. Из условий сшивания (скорость потока в области 9 равна нулю и контактная поверхность неподвижна) находятся параметры гелия в области 3. Приравнявая изменения скорости течения и скорости звука в гелии при его расширении в веере волн разрежения от состояния 5 к уже известному состоянию 3, определяется число Маха ударной волны в промежуточной камере  $M_{s4}$ , необходимое для ударного нагрева гелия от начальных значений параметров 4 до состояния 5. Далее производится расчет расширения водорода в веере волн разрежения от начального состояния 7 до значения скорости в области 6, равного уже вычисленному ее значению в области 5. В этой области течения расчет производится с использованием уравнения состояния реального газа с вириальными коэффициентами. При неравенстве давлений в областях 5 и 6 варьируется начальное давление рабочего газа  $P_1$  и расчет повторяется до согласования указанных выше величин.

На основе такого расчета были определены размеры отсеков трубы и начальные условия эксперимента, обеспечивающие условия сшивания, а также параметры газа за падающей и отраженной ударными волнами до чисел Маха  $M_{s1} = 25$ . На рис. 2 показаны зависимости относительных начальных давлений в секциях ударной трубы от числа Маха падающей ударной волны для ком-



**Рис. 3.** Зависимость числа Маха в промежуточной секции ударной трубы  $M_{s4}$  от интенсивности ударной волны в рабочем газе  $M_{s1}$ .

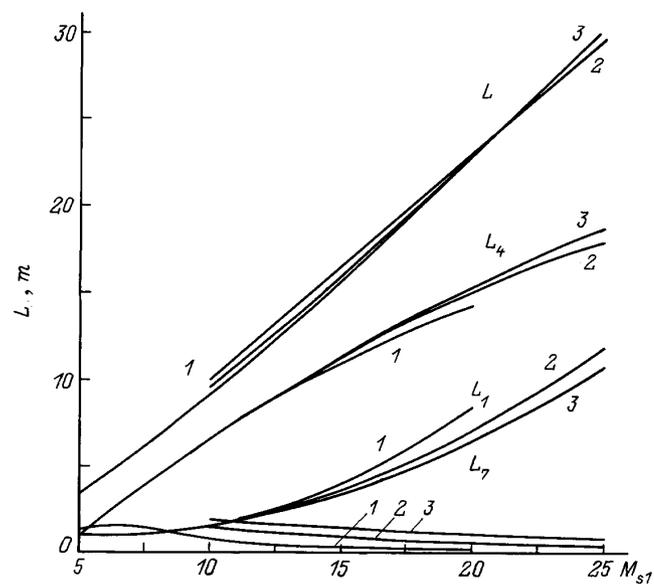
бинации газов водород–гелий–аргон при трех значениях температуры толкающего газа (здесь и далее 1 — 293, 2 — 473, 3 — 723 К). Видно, что нагрев позволяет существенно уменьшить начальный перепад давлений в камере высокого давления и промежуточной секции. Так, для осуществления условий сшивания при  $M_{s1} = 20$  и  $T_7 = 293$  К необходим общий перепад давлений порядка  $10^7$  и начальное давление в канале трубы должно быть менее 0.1 Па. Проведение экспериментов при таких низких начальных давлениях является сложной задачей, с одной стороны, в связи с необходимостью обеспечения должной герметизации канала трубы, а с другой стороны, при таких давлениях поперечный размер пограничного слоя на стенках трубы становится соизмеримым с поперечным размером трубы. Подогрев толкающего газа при больших значениях  $M_{s1}$  позволяет на два порядка уменьшить общий перепад давлений и, следовательно, увеличить начальное давление рабочего газа.

На рис. 3 для этой же комбинации газов приведена зависимость числа Маха ударной волны в промежуточной камере  $M_{s4}$  в условиях сшивания от числа Маха в рабочем газе. В диапазоне изменения  $M_{s1}$  от 5 до 20 величина  $M_{s4}$  меняется от 1.5 до 6.5 и практически не зависит от начальной температуры толкающего газа.

На рис. 4 показаны необходимые длины всей трубы  $L$  и отдельных ее отсеков как функции числа  $M_{s1}$ . Длины вычислены на основе построения диаграмм волновых процессов в трубе при фиксированном времени существования невозмущенного состояния газа в области за отраженной волной, равном 1 мс. Общая длина трубы при числе Маха  $M_{s1} = 20$  достигает 20 м, т. е. величины, достаточно большой с точки зрения возможных эффектов затухания ударных волн. Однако положение здесь не столь критично в связи с тем, что наибольший вклад в

эту длину вносит промежуточный отсек (около 75%). Давление здесь достаточно велико, а числа Маха  $M_{s4}$  сравнительно малы и эффект затухания ударной волны в гелии должен быть не столь явно выражен.

Результаты расчетов были сравнены с данными экспериментального моделирования режимов течения со сшитой контактной поверхностью. Экспериментально были осуществлены режимы, близкие к режиму сшивания, для комбинации водород–гелий–аргон при значениях числа Маха  $M_{s1} = 6.3$  и 11. Рабочее время установки определялось в результате анализа измерений давления газа, его проводимости и излучения в областях за падающей и отраженной ударными волнами. Эксперименты проводились при постоянных параметрах в камере высокого давления ( $P_7 = 40$  МПа,  $T_7 = 723$  К) и канале низкого давления ( $P_1 = 4$  КПа,  $T_1 = 298$  К). Давление гелия  $P_4$  в промежуточной секции трубы варьировалось с целью реализации режима сшивания. На рис. 5 показаны типичные осциллограммы сигналов датчика давления (верхняя), расположенного в торце канала трубы, и зонда для измерения проводимости газа (нижняя), отстоящего от торца трубы на 20 мм. Приведенные здесь данные были получены при значениях  $P_4 = 0.5$  (a), 0.1 (b), 10 кПа (c) и числа Маха  $M_{s1} = 10.9$ , 11 и 10.4 соответственно. Осциллограммы на рис. 5, a соответствуют случаю взаимодействия отраженной ударной волны с контактной поверхностью с генерацией ударной волны в область отражения, что сопровождается ростом давления в результате многократного последовательного отражения ударной волны от контактной поверхности и торца канала трубы. Изменение амплитуды сигнала зонда проводимости соответствует последовательно моментам отражения ударной волны от торца канала и прихода в измерительное сечение толкающего газа (гелия). Постоянная амплитуды сигнала соответствует постоянству



**Рис. 4.** Размеры отсеков двухдиафрагменной ударной трубы в функции  $M_{s1}$  в режиме сшивания.

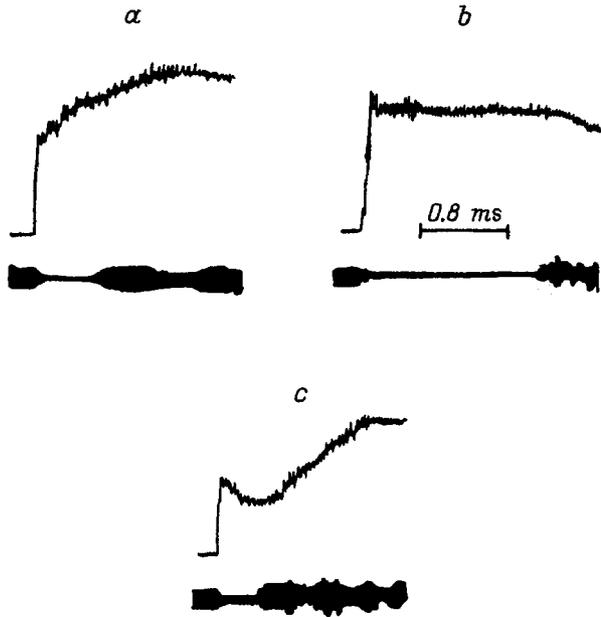


Рис. 5. Осциллограммы сигналов датчика давления и проводимости.

электропроводности среды в измерительном сечении. Осциллограмма сигнала датчика давления на рис. 5, *c* показывает результат взаимодействия отраженной ударной волны и контактной поверхности с образованием волн разрежения, вызывающих уменьшение давления. Дальнейшее увеличение давления связано с проникновением к торцу трубы гелия, что отражается также на изменении амплитуды сигнала зонда проводимости. Осциллограммы на рис. 5, *b* соответствуют режиму течения со сшитой контактной поверхностью. В этом случае сигналы датчика давления и зонда проводимости характеризуются постоянством амплитуды в течение более 1 мс. Реализованный при значении числа Маха  $M_{s1} = 11$  режим обеспечивает рабочее время, более чем в 5 раз превышающее соответствующее значение в однодиафрагменном варианте.

На рис. 6 показана зависимость рабочего времени однодиафрагменной ударной трубы от числа Маха падающей ударной волны для установок [8,9], близких по своим размерам к данной. Заштрихованная область соответствует диапазону изменения рабочего времени для режимов, в которых в качестве толкающего газа используется водород или гелий, а толкаемым газом является воздух, азот или аргон. Вертикальными столбиками обозначены времена, реализующиеся в режиме, близком к сшиванию контактной поверхности. Приведенные на рисунке данные показывают практическую бесперспективность использования однодиафрагменных ударных труб при значениях  $M_{s1} > 7$  для исследования сравнительно длительных процессов, таких как истечение ударно нагретого газа из сверхзвуковых сопел. Рабочие времена, реализуемые на двухдиафрагменной ударной трубе ФТИ (на рисунке показаны квадратики-

ми), существенно расширяют возможности ударно трубного эксперимента при изучении физических явлений в высокоэнтальпийных потоках.

Расчетные значения параметров аргона в области отражения при  $M_{s1} = 11$  следующие: давление  $P_s = 3$  МПа, температура торможения  $T_s = 14\,400$  К, степень ионизации  $\alpha = 11.3\%$ , концентрация электронов  $n_e = 1.5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Более подробно методика расчета и условия экспериментальной реализации режимов сшивания контактной поверхности для комбинации водород-гелий-аргон описаны в [10].

Ударная труба представляет также определенный интерес и как инструмент для генерации достаточно больших объемов плазмы с высоким значением параметра неидеальности  $\Gamma$  (отношение энергии взаимодействия частиц к тепловой). На ударной трубе ФТИ в плазме ксенона, сжимаемого нагретым до 750 К водородом [11], было получено значение  $\Gamma \approx 1$ . При числе Маха падающей ударной волны  $M_{s1} = 17$  были достигнуты температура  $T = 17\,000$  К и концентрация электронов  $n_e = 3 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. "Пробка" ударно нагретого газа размером 0.2–0.4 м сохранялась в течение 200–300 мкс. Для сравнения укажем, что в стационарных дугах высокого давления ксенона достигается значение  $\Gamma \approx 0.2$ .

Еще более длительные времена существования плазмы были получены при осуществлении условий сшивания в двухдиафрагменном режиме для комбинации газов водород-водород-ксенон при значении числа Маха  $M_{s1} = 14.8$ . Значения расчетных параметров плазмы составили  $P_s = 14$  МПа,  $T_s = 16\,200$  К,  $\alpha = 44\%$ ,  $n_e = 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>,  $\Gamma \approx 0.3$ , а рабочее время — величину около 1 мс.

Для комбинации газов водород-гелий-воздух расчетные значения начальных параметров используемых газов и длины секций трубы оказались идентичными соответствующим величинам для комбинации водород-гелий-аргон. В силу сложного состава рабочего газа его параметры в области за отраженной ударной волной существенно отличаются от параметров в аргоне и для значения числа Маха  $M_{s1} = 10$  и начальных значений

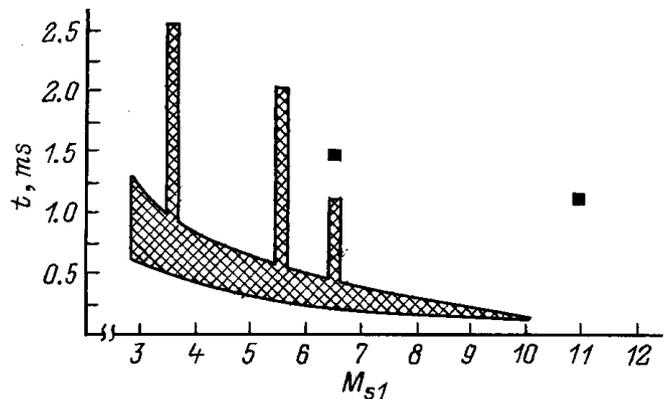


Рис. 6. Зависимость рабочего времени ударной трубы от интенсивности ударной волны в рабочем газе.

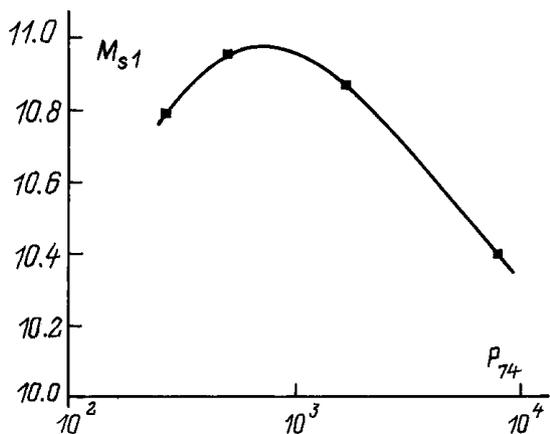


Рис. 7. Зависимость числа Маха в рабочем газе от давления в промежуточной камере ударной трубы.

давления  $P_7 = 100$  МПа и температуры толкающего газа  $T_7 = 823$  К составили: давление  $P_8 = 7.4$  МПа, температура торможения  $T_8 = 7500$  К.

Использованный способ реализации режима сшивания позволяет сравнительно просто достичь желаемого путем варьирования только одного начального параметра — давления в промежуточной камере. Как показали эксперименты, условия сшивания в этом случае реализуются при достижении максимального значения числа Маха  $M_{s1}$  в канале ударной трубы. На рис. 7 показана зависимость числа Маха в рабочем газе от давления в промежуточной секции трубы для рассмотренной комбинации водород–гелий–аргон. Режим сшивания в этом случае достигается при значении  $M_{s1} = 11$ .

Начальные перепады давлений, при которых были реализованы указанные выше режимы, оказались в 5–10 раз больше расчетных. Это является результатом игнорирования в расчете влияния эффектов, обусловленных главным образом вязкостью газов. В работе [12] выполнен численный расчет течения в двухдиафрагменной ударной трубе с учетом пограничного слоя в промежуточной камере и решена задача оптимизации режимов работы трубы с целью получения максимального значения скорости ударной волны в рабочем газе. Учитывая это, факт реализации режима сшивания вблизи максимума интенсивности ударной волны представляется весьма интересным. Результаты такого расчета могут быть использованы для определения уточненных значений начальных давлений для режима сшивания.

Заметим, что применение двухдиафрагменного режима может быть полезным не только с точки зрения реализации условий сшивания контактной поверхности в широком диапазоне изменения числа Маха ударной волны, но и по соображениям сохранения состава исследуемой среды. Применение в качестве буферного инертного газа, например, гелия обеспечивает отсутствие химических реакций на его границе с ударно нагретым рабочим газом (плазмой) [13].

## Исследование истечения различных газов из конического гиперзвукового сопла

Течение реального газа в гиперзвуковом сопле имеет ряд специфических особенностей, которые следует учитывать при определении его параметров.

1. Для течения, в котором изменение параметров газа происходит в соответствии с изменением площади сечения канала, существенным фактором является развитие пограничного слоя на его стенках. В связи с этим значение относительного изменения площади сечения должно быть поправлено на величину, определяемую толщиной пограничного слоя в данном сечении.

2. При течении в сопле газов, имеющих достаточно низкую температуру торможения или высокую температуру конденсации, а также при исследовании полей течения при больших степенях расширения следует учитывать возможность конденсации газа, которая приводит к существенному изменению параметров течения.

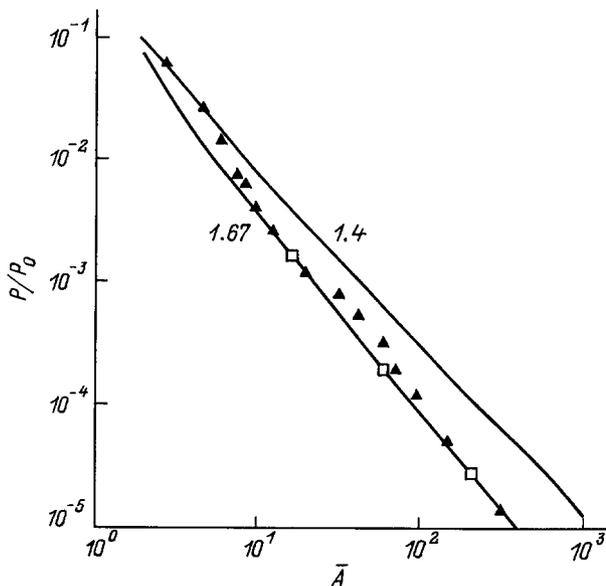
3. Одной из основных особенностей, характеризующих расширение высокотемпературных потоков газа, является неравновесность процесса дезактивации внутренних степеней свободы в расширяющемся потоке. Неравновесность термодинамических процессов приводит к существенному изменению основных параметров течения, таких как температура, статическое давление, число Маха сверхзвукового потока.

С учетом вышесказанного одним из главных факторов, определяющих качество экспериментальных исследований такого рода задач, является изучение потока внутри канала. С целью исследования однородности поля течения в коническом сопле с углом раствора  $22^\circ$  и относительным расширением  $\bar{A} = 625$  были проведены измерения радиального распределения полного давления в различных сечениях сопла. Была найдена поправка к значению относительного расширения за счет нарастания пограничного слоя и с учетом этого построены распределения параметров в расширяющемся потоке.

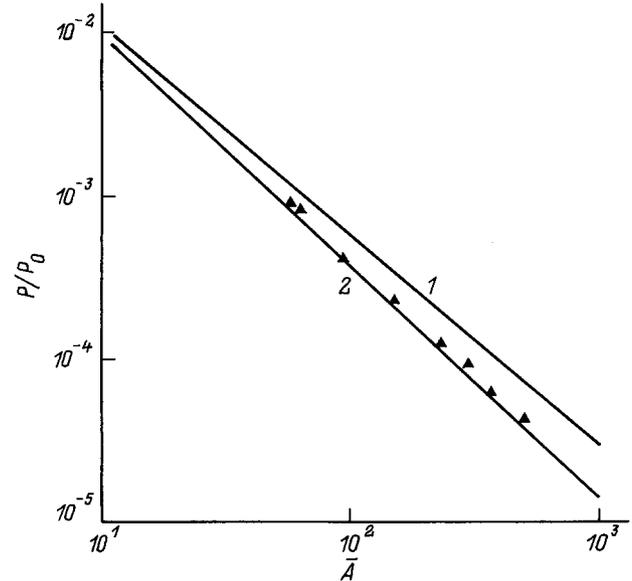
Одним из наиболее чувствительных к изменению термодинамического состояния среды параметров расширяющегося потока является величина статического давления. Для измерения этой величины был изготовлен приемник статического давления с временным разрешением около  $100 \mu\text{s}$ . Тарировка приемника проводилась в сверхзвуковом потоке гелия в условиях отсутствия физико-химических процессов, а также с учетом реального расширения потока в сопле. Погрешность измерения статического давления составила величину не более 10%.

С помощью приемника статического давления было проведено исследование сверхзвукового расширения в коническом сопле водорода с температурой торможения  $T_0 = 293$  К и азота с  $T_0 = 4000$  К. В эксперименте проводилось измерение статического давления вдоль оси сопла и сравнение этих данных с результатами расчетов.

При исследовании истечения водорода, имеющего низкую температуру торможения, предполагалось, что в процессе расширения должны найти свое отражение особенности обмена энергией между поступательными и вращательными степенями свободы. На рис. 8 показаны зависимости отношения статического давления к давлению торможения  $P/P_0$  от величины относительного расширения  $\bar{A}$ , полученные в результате обработки эксперимента (значки) и численного расчета (линии). Значение  $P_0$  определялось по результатам измерения давления на входе в сопло с точностью не хуже 10%, а отношение  $P/P_0$  — с точностью не хуже 20%. Кривые получены из расчета течения в сопле с учетом пограничного слоя на его образующих для одноатомного ( $\gamma = 1.67$ ) и двухатомного ( $\gamma = 1.4$ ) газов. Результаты контрольного измерения статического давления были проведены при истечении гелия и показаны на рисунке светлыми значками. Темные значки соответствуют измерениям в расширяющемся водороде. Анализ результатов экспериментальных измерений показывает, что в процессе расширения вблизи критического сечения водород ведет себя как двухатомный газ. Затем наблюдается плавное отклонение распределения статического давления в сторону кривой для одноатомного газа. При значении относительного расширения, приблизительно равном  $\bar{A} = 30$ , имеет место рост статического давления с последующим переходом распределения экспериментальных точек к кривой для одноатомного газа. Первый из рассмотренных участков изменения распределения давления в процессе расширения обусловлен дезактивацией вращательных степеней свободы. Так, при  $\bar{A} = 10$  температура потока не превышает несколько десятков градусов Кельвина, а обмен энергией между поступательными и вращательными степенями свободы становится неэффективным при температуре около 100 К. Последу-



**Рис. 8.** Распределение статического давления при расширении в сопле водорода с температурой торможения  $T_0 = 293$  К.



**Рис. 9.** Распределение статического давления при расширении в сопле ударно нагретого азота.

ющий рост давления связан с конденсацией водорода. При дальнейшем понижении температуры в процессе расширения водород вновь проявляет себя как одноатомный газ.

Результаты экспериментального измерения статического давления при истечении ударно нагретого азота также сравнивались с расчетом ( $P_0 = 10$  МПа,  $T_0 = 4000$  К) для двух предельных случаев течения: равновесного и течения с замороженными колебательными степенями свободы. На рис. 9 данные эксперимента показаны значками, кривая 1 соответствует расчету течения в предположении равновесного расширения газа, кривая 2 — течению с мгновенным замораживанием колебательных степеней в критическом сечении сопла. Сравнение данных показывает, что в условиях эксперимента наблюдается течение, близкое к замороженному. Расчетное значение числа Маха в выходном сечении сопла для этого случая равно 10.5, температура потока  $T = 200$  К, давление  $P = 0.2$  КПа. Температура замороженных колебаний остается на уровне около 2000 К.

Приведенные результаты экспериментального исследования процесса сверхзвукового расширения холодного водорода и ударно нагретого азота демонстрируют возможности изучения на двухдиафрагменной ударной трубе ФТИ физических явлений в неравновесных потоках различных газов в широком диапазоне изменения температуры торможения последних.

## Заключение

Мировой опыт использования ударных труб в газодинамическом эксперименте говорит о том, что в силу сложности реального течения и особенностей, присущих

конкретной установке, экспериментальная опробация режимов течения в ударной трубе является необходимым этапом аттестации качества экспериментальной установки.

Созданная в ФТИ ударная труба является высокоэнергетичной установкой, позволяющей с высокой степенью точности воспроизводить параметры ударно нагретых газов в серии отдельных опытов.

Конструктивные особенности трубы дают возможность организовать различные режимы работы установки, в том числе двухдиафрагменный вариант, существенно расширяющий реализуемый в эксперименте диапазон изменения определяющих параметров течения. Реализация в двухдиафрагменной ударной трубе ФТИ режимов течения со сшитой контактной поверхностью обеспечивает получение высоких значений параметров торможения рабочего газа при значениях числа Маха ударной волны вплоть до  $M_{s1} = 15$ . Постоянство параметров в "пробке" ударно нагретого газа сохраняется при этом в течение времени более 1 мс, что существенно превышает ту же величину для однодиафрагменного варианта работы ударной трубы.

В комплексе ударная труба–сопло возможно проведение исследований взаимодействия струй различных газов между собой, с преградой в поле течения, обтекания тел потоком различных газов, а также изучение физических явлений, имеющих место в сверхзвуковом расширяющемся потоке.

Перечисленные выше особенности с учетом многолетнего опыта эксплуатации установки дают основания утверждать, что двухдиафрагменная ударная труба ФТИ является прецезионным инструментом в газодинамических исследованиях, позволяющим реализовать в эксперименте уникальные по параметрам газовые (плазменные) состояния.

## Список литературы

- [1] Наумова М.Н. // ЖВММФ. 1961. № 2. С. 295.
- [2] Михайлов В.В. // Инж. сб. 1960. 31 с.
- [3] Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С. и др. Таблицы термодинамических функций воздуха для температур от 300 до 6000 К и давлений от 0.001 до 1000 атм. М.: АН СССР, 1961.
- [4] Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С. и др. Таблицы термодинамических функций воздуха для температур от 6000 до 12000 К и давлений от 0.001 до 1000 атм. М.: АН СССР, 1958.
- [5] Предводителев А.С., Ступоченко Е.В., Плешанов А.С. и др. Таблицы термодинамических функций воздуха для температур от 12000 до 20000 К и давлений от 0.001 до 1000 атм. М.: АН СССР, 1959.
- [6] Mirels H. // Phys. Fluids. 1966, Vol. 9. P. 1907.
- [7] Козлов Г.И., Ступицкий Е.Л. Таблицы термодинамических параметров аргона и ксенона за падающей и отраженной волной. М.: ИПМ АН СССР, 1969.
- [8] Fuehrer R.G. // VII Intern. Shock Tube Symp. Toronto, 1969. P. 31–59.
- [9] Dumitrescu L.Z., Popescu C., Brun R. // VII Intern. Shock Tube Symp. Toronto, 1969. P. 751–770.
- [10] Заварин Д.Г., Масленников В.Г., Мякишев А.К., Серова Е.В. Теоретическое и экспериментальное исследование режимов сшивания контактной поверхности в двухдиафрагменной ударной трубе. Отчет ФТИ. Л., 1976. Деп. ВНИИ. № Б551201. 50 с.
- [11] Жуков Б.Г., Масленников В.Г., Тумакаев Г.К. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2194–2196.
- [12] Морозова Л.В., Рузавин В.Н. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 3. С. 53–58.
- [13] Масленников В.Г., Серова Е.В., Тумакаев Г.К. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 6. С. 354–358.