

03

Влияние материала диафрагмы на входе в сверхзвуковое сопло ударной трубы на обтекание затупленного тела

© Н.А. Монахов, П.А. Попов, В.А. Сахаров, С.А. Поняев, Р.О. Куракин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nikolay.monakhov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 27 февраля 2024 г.

Принято к публикации 27 февраля 2024 г.

Представлены результаты экспериментов по измерению давления и теплового потока вблизи критической точки затупленного тела в экспериментах на ударной трубе с соплом. Показано, что фрагменты диафрагмы на входе в сопло оказывают существенное влияние на структуру течения вблизи критической точки модели и искажают сигналы датчиков давления и теплового потока. Предложен способ существенного улучшения качества высокоскоростного потока за счет подбора оптимального материала и толщины диафрагм на входе в сверхзвуковое сопло.

Ключевые слова: ударная труба, высокоскоростное течение, разрыв диафрагмы, измерение теплового потока.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57528.49-24

Введение

Экспериментальное исследование обтекания моделей высокоэнтуальпийным потоком, как правило, осуществляется на газодинамических установках импульсного действия, таких, как ударная труба [1,2] с соплом в торце. Особенностью таких установок является наличие диафрагмы, отделяющей вход в сопло от канала низкого давления ударной трубы. После отражения ударной волны от торца трубы происходит разрушение диафрагмы, сопровождающееся вовлечением ее фрагментов в поток. Присутствие твердых частиц в потоке газа нарушает ударно-волновую картину вблизи обтекаемой модели [3,4] и искажает показания датчиков на ее поверхности, что приводит к уменьшению длительности квазистационарного обтекания исследуемых моделей и существенному отклонению газодинамических параметров высокоскоростного течения от ожидаемых [5–9]. Результаты численного моделирования течения в ударном слое при воздействии высокоинерционных частиц показывают, что при столкновении относительно крупных частиц с обтекаемым телом происходит их отражение и последующее движение навстречу сверхзвуковому потоку. Это движение сопровождается разрушением стационарной ударно-волновой структуры и образованием конусообразной возмущенной области с вершиной, движущейся вместе с частицей, а также формированием импактной кольцевой струи, направленной на поверхность обтекаемого тела и взаимодействующей с ней с образованием зоны повышенного давления и конвективного теплообмена [10–14]. Частицы меньшего размера в силу своей малой инерционности движутся вместе с потоком и не оказывают существенного влияния на структуру течения, регистрируемую при помощи тене-

вой диагностики. Их присутствие проявляется в виде высокочастотного шума в сигналах датчиков давления, не влияя на среднее значение измеряемого давления.

Дополнительная проблема, связанная с присутствием в потоке твердых частиц, заключается в механическом повреждении поверхности чувствительных элементов датчиков, расположенных на поверхности модели, и приводящая, в конечном счете, к их разрушению. В основном данная проблема касается тепловых измерений, поскольку рабочая поверхность тепловых датчиков должна находиться в непосредственном контакте с набегающим потоком газа [7]. В настоящее время для измерения тепловых потоков на импульсных газодинамических установках применяются тонкопленочные датчики сопротивления [15] и разнообразные термоэлектрические датчики на основе тонких пленок с искусственной анизотропией [16,17], коаксиальные термопары [7], анизотропные термоэлементы из висмута и гетерогенных металлических структур [18,19]. Наиболее подвержены воздействию твердых частиц в высокоскоростном потоке, создаваемом в ударной трубе, тепловые датчики на основе тонких пленок. Практически такие датчики выдерживают один эксперимент. Коаксиальные термопары обладают большей механической стойкостью, однако воздействие твердых частиц на рабочую поверхность коаксиальной термопары постепенно приводит к нарушению контакта в зоне спая и к разрушению самого датчика [7].

Целью настоящей работы является поиск подходов, способствующих уменьшению количества фрагментов диафрагмы, образующихся при ее разрушении, и улучшению качества высокоскоростного потока. Осуществлялся подбор материала и толщины диафрагмы на входе в сверхзвуковое сопло. Поскольку полностью исключить

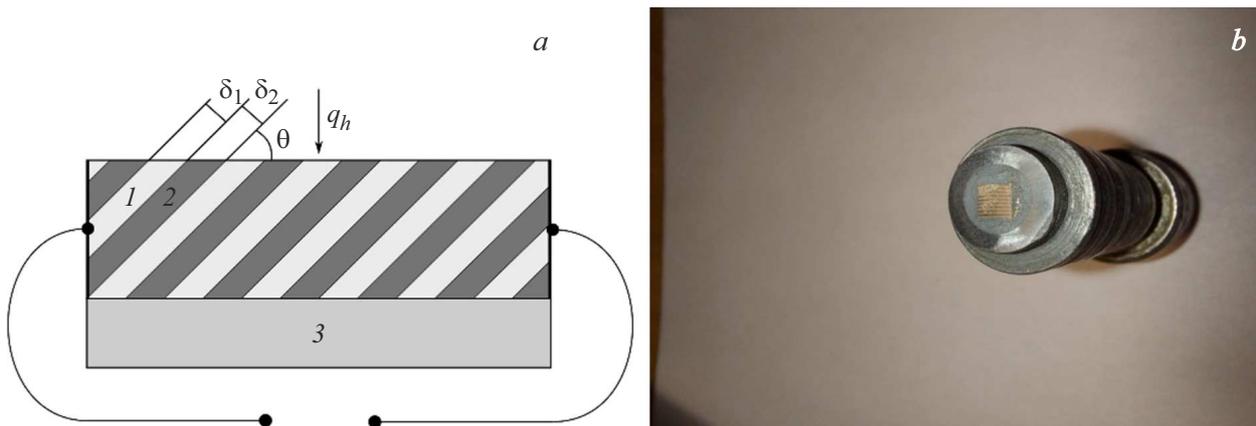


Рис. 1. Внутренняя структура чувствительного элемента ГДТП (а) и внешний вид используемого датчика, закрепленного во вставке (б).

наличие фрагментов диафрагмы в потоке газа не удастся, актуальным также является создание материалов и конструкций тепловых датчиков, обладающих более высокой механической прочностью, а также контроль качества потока с помощью измерений давления и теплового потока вблизи критической точки обтекаемой модели и по получаемым теневым картинам обтекания.

1. Датчик теплового потока на основе металлических гетерогенных структур

Собственный опыт измерений теплового потока на ударных трубах показывает, что наиболее удобными для применения в экспериментах и стойкими к механическим воздействиям являются тепловые датчики на основе анизотропных материалов (кристаллический висмут и металлическая гетерогенная структура). Тепловой датчик на основе висмута представляет собой батарею из 10–20 последовательно соединенных термоэлементов, уложенных на подложку из слюды [18,19]. Такое количество спаев увеличивает риск нарушения контакта в результате воздействия на датчик потока с твердыми частицами. Указанных недостатков лишен тепловой датчик на основе металлических гетерогенных структур (ГДТП), используемый в настоящей работе.

Чувствительный элемент ГДТП представляет собой пластинку из чередующихся слоев металлов 1 и 2 толщиной δ_1 и δ_2 , ориентированных под углом θ к рабочей поверхности (рис. 1, а) и обладающих различными коэффициентами Зеебека. Слои соединены друг с другом с помощью диффузионной сварки. Пластинка закрепляется на электроизоляционной подложке 3. К боковым граням припаиваются провода для регистрации электрического сигнала. Для изготовления чувствительного элемента используются пары металлов

с максимально отличающимся коэффициентом Зеебека: хромель–алюмель, медь–никель, сталь–никель и др. [18]. Принцип действия ГДТП основан на генерации термоэлектрического поля в структуре с анизотропией термоэдс при появлении градиента температуры [20]. Ожидаемый уровень вольт-ваттного коэффициента таких датчиков составляет 10–20 $\mu\text{V}/\text{W}$ и определяется плотностью, теплопроводностью и коэффициентом Зеебека пары используемых для его изготовления металлов, а также количеством слоев и их толщиной [21]. В этом случае уровень сигнала датчика при воздействии теплового потока с типичной для газодинамического эксперимента на ударных трубах плотностью $\sim 1 \text{ MW}/\text{m}^2$ не превышает 100 μV . По этой причине для регистрации сигнала таких датчиков используется устройство с коэффициентом усиления не менее 100.

Для калибровки ГДТП и его использования для измерения теплового потока в импульсном газодинамическом эксперименте часто возникает необходимость монтажа датчика на поверхности различных обтекаемых моделей и в каналах ударных труб. Для этих целей была разработана съемная металлическая вставка специальной конструкции (рис. 1, б). Полная длина вставки с учетом разьема составляла 47 мм, из них сам корпус — 31 мм, диаметр — 14 мм. Перед установкой датчика во вставку осуществлялась подготовка всех поверхностей посадочного объема путем шлифования и полировки, далее посадочный объем заполнялся связывающим составом. В качестве различных вариантов связывающего состава испытывались двухкомпонентный эпоксидный клей марки Rохіроl, а также акриловая кислота. В случае использования акриловой кислоты посадочный объем подвергался дополнительному тепловому воздействию от облучения лазером для кристаллизации аморфной структуры связывающего состава. Предварительные испытания на ударной трубе продемонстрировали более высокую стойкость датчика к сильному механическому и эрозионному воздействию высокоскоростного потока

в случае использования акриловой кислоты в качестве связывающего состава. По этой причине все приведенные далее экспериментальные результаты получены именно с таким способом крепления ГДТП на вставке.

2. Описание экспериментальной установки

Большая ударная труба ФТИ им. А.Ф. Иоффе [22] является инструментом для генерации высокоскоростных течений с достаточно широким диапазоном основных параметров (плотность, давление, температура). Схема установки показана на рис. 2. Длина камеры высокого давления составляет 3.3 м, камеры низкого давления — 12.4 м. Диаметр внутреннего сечения ударной трубы — 100 мм.

Скорость ударной волны измерялась базовым методом с помощью двух пьезоэлектрических датчиков давления конструкции Г.Н. Сунцова, установленных в канале низкого давления заподлицо с внутренней поверхностью ударной трубы на расстоянии 230 мм друг от друга. Погрешность измерения скорости ударной волны не превышала 3%.

В конце камеры низкого давления ударной трубы установлено сверхзвуковое коническое сопло, выходящее в демпферный бак. Угол полураствора сопла равен 11° , а диаметр критического сечения равен 10 мм, относительное расширение составляет 100.

По начальным условиям эксперимента (начальному давлению азота в канале низкого давления ударной трубы и числу Маха падающей ударной волны) вычислялись параметры газа за отраженной ударной волной и вблизи поверхности модели. Равновесные параметры газа за отраженной ударной волной рассчитывались с учетом реальных свойств газа при высоких температурах. Параметры потока на выходе из сопла рассчитывались по одномерной модели с учетом конечной скорости химических реакций.

Полусферическая модель диаметром 70 мм изготавливалась из ABS-пластика методом 3D-печати. Подобный способ изготовления продиктован сложной топологией модели ввиду необходимости крепления датчиков внутри модели и их вывода на ее поверхность. Модель закреплялась внутри демпферного бака вдоль оси сопла

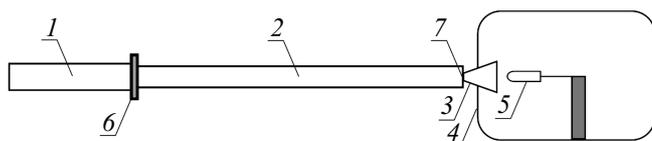


Рис. 2. Схема Большой ударной трубы ФТИ им. А.Ф. Иоффе: камера высокого (1) и низкого давления (2), сверхзвуковое сопло (3), демпферный бак (4), исследуемая модель (5), металлическая диафрагма (6), диафрагма на входе в сверхзвуковое сопло (7).

на расстоянии 30 мм от его среза. Такое положение модели обеспечивало удобство теневой диагностики обтекания в эксперименте. Измерения давления торможения потока вблизи критической точки модели осуществлялись с помощью пьезоэлектрического датчика РСВ модели 113В28 с чувствительностью 15.6 мВ/кПа и временным разрешением не хуже $2 \mu\text{s}$. Для защиты от повреждения фрагментами диафрагмы датчик давления устанавливался внутри модели и соединялся с ее поверхностью цилиндрическим каналом диаметром 2 мм и длиной 5 мм. Сигналы датчика давления и теплового датчика регистрировались с помощью осциллографов типа Tektronix TDS 1002 с временным разрешением $1 \mu\text{s}$.

Тепловой датчик ГДТП размером в плане 3×3 мм и толщиной 0.5 мм состоял из 9 слоев меди и 9 слоев никеля и был установлен во вставке (рис. 1, б). Датчик был подключен к усилителю, собранному на базе микросхемы INA128 с коэффициентом усиления 216, установленному внутри модели. Полоса пропускания усилителя ~ 200 kHz обеспечивает временное разрешение пары „датчик+усилитель“ не хуже $5 \mu\text{s}$, которое является достаточным для измерения тепловых потоков в газодинамических экспериментах с характерной длительностью ~ 1 ms. В рамках используемой одномерной термоэлектрической модели датчика электрический сигнал пропорционален разности температур между его рабочей и тыльной поверхностями. Расчет теплового потока по электрическому сигналу датчика проводился согласно методике [23], основанной на итеративном решении одномерного уравнения теплопроводности. С целью защиты от электромагнитных наводок сигнала теплового датчика электрическое питание канала его регистрации осуществляется от аккумулятора.

Перед использованием этого датчика в экспериментах по обтеканию модели была выполнена его калибровка с помощью методики, основанной на процессе нагрева газа за отраженной ударной волной [24]. В силу особенностей конструкции Большой ударной трубы ФТИ проведение измерений за отраженной ударной волной требует существенной модификации ее соплового блока. По этой причине калибровочные тепловые измерения выполнялись на Малой ударной трубе ФТИ [19,24,25] с диаметром внутреннего сечения 50 мм. Малая ударная труба была оборудована быстродействующим клапаном, обеспечивающим старт ударно-волнового процесса в трубе при известном давлении в камере высокого давления. Такой подход обеспечивал течение за отраженной ударной волной с достаточно точно предсказуемыми газодинамическими параметрами, что являлось необходимым условием для измерения калибровочного коэффициента ГДТП с необходимой точностью.

В одномерном приближении при отсутствии диссоциации и ионизации газа и степенной зависимости теплопроводности и плотности газа от температуры за ударной волной тепловой поток в торцевую стенку при отражении ударной волны зависит от времени $q(t) \propto t^{-1/2}$ как [26]. Сравниваются теоретические и

Статистика экспериментов с использованием диафрагм из лавсана по наличию регистрируемых на теневых картинах артефактов течения

P_1, mbar	Количество экспериментов	Без артефактов теневой картины	С артефактами теневой картины	Процент экспериментов без артефактов теневой картины
0–40	23	22	1	96
41–100	11	6	5	55
101–300	31	16	15	52
301–800	23	8	15	35

экспериментальные значения нормированного теплового потока $q \cdot \sqrt{t}$, зависящие только от параметров газа за отраженной ударной волной. По результатам двух данных экспериментов, вольт-ваттный коэффициент ГДТП S_0 составил $15 \mu\text{V/W}$.

Визуализация теневых картин обтекания модели осуществлялась при помощи теневого прибора ИАБ-451. В качестве источника подсветки использовался импульсный полупроводниковый лазер с длительностью импульса порядка 10 ns. Теневая картина регистрировалась цифровым фотоаппаратом. Синхронизация всей измерительной аппаратуры, а также запускающего импульса для полупроводникового лазера, осуществлялась по сигналу пьезоэлектрического датчика давления, расположенного в измерительной секции ударной трубы на расстоянии 1080 mm от входа в сверхзвуковое сопло.

Перед началом экспериментов секции ударной трубы отделялись друг от друга металлической диафрагмой с крестообразной насечкой. Разрыв металлической диафрагмы происходил при достижении необходимого давления в камере высокого давления. На входе в сопло устанавливалась тонкая диафрагма, разрыв которой в момент отражения ударной волны от торца трубы реализовывал запуск газодинамического процесса в сопле. В настоящей работе экспериментально исследованы особенности высокоскоростного обтекания модели при использовании различных диафрагм на входе в сопло. Использовались диафрагмы из лавсана толщиной 80 μm , а также полиэтиленовые диафрагмы толщиной 5 и 10 μm .

3. Результаты

В настоящее время наибольший интерес представляет исследование высокоэнтальпийных течений, моделирующих аэротермодинамику высокоскоростного полета в различных атмосферах. Был выполнен ряд предварительных экспериментов по изучению максимальных возможностей ГДТП по тепловым измерениям при обтекании высокоскоростными потоками с высокими температурами торможения. Оказалось, что импульсная

нагрузка потока при температуре торможения $\sim 5000 \text{ K}$ не приводила к разрушению датчика или к существенному изменению его свойств даже после серии из 10 экспериментов, что является хорошим показателем по сравнению с датчиками на основе кристаллического висмута. При более высокой температуре торможения $\sim 6000 \text{ K}$ „время жизни“ датчика на модели не превышало 1–2 эксперимента, что следует считать на текущий момент верхней границей диапазона температуры торможения, при которой допустимо применение ГДТП для тепловых измерений. В таких экспериментах датчик срывало потоком с поверхности модели, что, по-видимому, вызвано деструкцией акриловой основы, соединяющей датчик с поверхностью модели, вследствие возникающего градиента температуры.

Поверхность чувствительного элемента теплового датчика загрязняется при обтекании и, строго говоря, требуется ее очистка перед каждым опытом, однако повторная калибровка датчика по методике [24] показала неизменность его вольт-ваттного коэффициента $S_0 = 15 \mu\text{V/W}$.

В ходе серии из более 80 экспериментов по обтеканию полусферической модели было обнаружено, что при использовании лавсановых диафрагм в ряде случаев на теневых картинах вблизи критической точки модели появляются возмущения головной ударной волны. Возникновение этих возмущений носило вероятностный характер. Анализ показал, что эти возмущения не возникают, если начальное давление в ударной трубе не превышает 40 mbar, во всех иных случаях эти возмущения появляются с некоторой частотой, причем их частота появления увеличивается при увеличении давления. Небольшая дополнительная серия экспериментов была выполнена на других соплах, позволяющих создать течение с различными числами Маха. В этом случае возмущения на теневых картинах обтекания появлялись лишь в единичных экспериментах.

В таблице приводятся статистические данные по частоте появления этих возмущений в зависимости от начальных условий газодинамического эксперимента.

Анализ литературы показал, что подобный эффект также неоднократно экспериментально наблюдался ра-

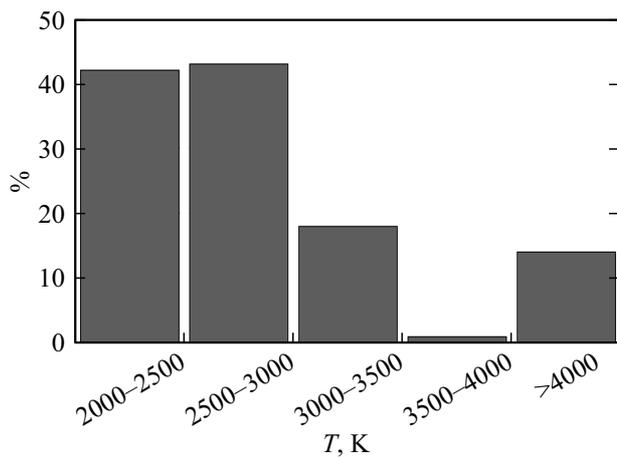


Рис. 3. Зависимость частоты появления возмущений фронта головной ударной волны от температуры торможения газа.

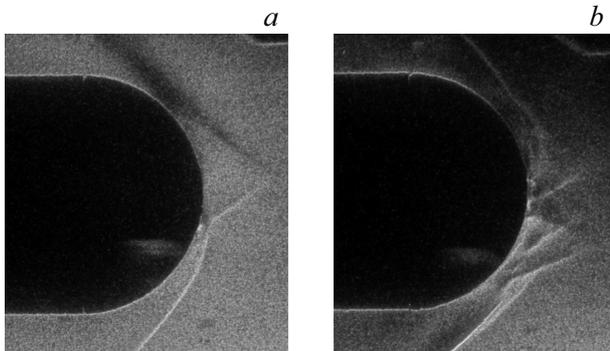


Рис. 4. Теневая фотография обтекания затупленного тела с возмущением от единичной частицы (а) и нескольких частиц (b).

нее [5,6,9] и обусловлен присутствием в высокоскоростном потоке твердых частиц различного размера, образующихся при разрушении лавсановой диафрагмы на входе в сверхзвуковое сопло. Резкое увеличение давления в момент прихода ударной волны приводит к образованию большого количества осколков диафрагмы в силу хрупкости лавсана, нагруженного давлением. В работе [27] исследовался процесс разрушения целлофановой диафрагмы, разделяющей камеру высокого и низкого давления ударной трубы. Установлено, что процесс разрушения начинается в точке максимального натяжения и сопровождается образованием как крупных, так и мелких осколков. Поскольку лавсан обладает близкими к целлофану механическими характеристиками, следует ожидать схожести процесса разрушения диафрагм из данных материалов.

На рис. 3 приводится зависимость появления возмущений головной ударной волны при обтекании полусферы от температуры торможения потока. Более редкое появление возмущений теневой картины обтекания при $P_1 < 40$ mbar и на других соплах обусловлено особен-

ностями разрушения диафрагмы (образованием мелких частиц) при более высокой температуре газа на входе в сопло, а также изменением времени их пролета и невозможностью их визуализации.

На рис. 4 приведены типичные теневые картины обтекания моделей с возмущением ударно-волновой структуры, вызванным единичной частицей (рис. 4, а) и несколькими частицами (рис. 4, б). Картины получены в момент времени $t = 1$ ms от момента прихода падающей ударной волны ко входу в сопло и начала разрушения диафрагмы на входе в сопло. Следует отметить, что определить продолжительность возмущения стационарной ударно-волновой структуры путем анализа результатов однокадровой теневой диагностики невозможно. Однако подобное изменение ударно-волновой картины влияет на газодинамические параметры потока вблизи критической точки модели и может быть зарегистрировано, например, с помощью измерения давления и теплового потока на поверхности обтекаемой модели.

На рис. 5 показаны сигналы датчика давления (рис. 5, а) и теплового датчика (рис. 5, б) в критической точке модели при обтекании ее сверхзвуковым потоком, содержащим твердые частицы лавсановой диафрагмы. В спектре сигнала датчика давления появляется высокочастотная составляющая (рис. 5, а). Эта компонента с частотой ~ 100 kHz присутствует практически во всех экспериментах. В ряде случаев амплитуда высокочастотных колебаний сильно возрастает. Это позволяет предполагать, что их появление связано с возбуждением собственных колебаний датчика давления. Остается открытым вопрос о роли твердых частиц в появлении этой компоненты в спектре сигнала датчика давления и динамике ее амплитуды. При этом средний уровень сигнала датчика давления остается соответствующим ожидаемому давлению торможения на стационарном участке обтекания модели. Как показал анализ результатов измерений, появление относительно продолжительных „провалов“ на сигнале датчика давления (в районе $t = 0.8$ ms) обязано твердым частицам, а именно нарушению ими ударно-волновой структуры головной волны.

Сигнал теплового датчика (рис. 5, б), пропорциональный разности температур на верхней и нижней поверхностях чувствительного элемента датчика, остается гладким в течение всего времени регистрации. Отличие от рассмотренного выше сигнала датчика давления обусловлено значительно большей инерционностью процессов теплопередачи в газе и чувствительном элементе датчика. Практический интерес представляет величина теплового потока к поверхности модели, которая рассчитывается по методике [21]. На рис. 6 приведено сравнение изменения давления и теплового потока в критической точке модели. График показывает строгую временную корреляцию изменения давления и теплового потока в критической точке.

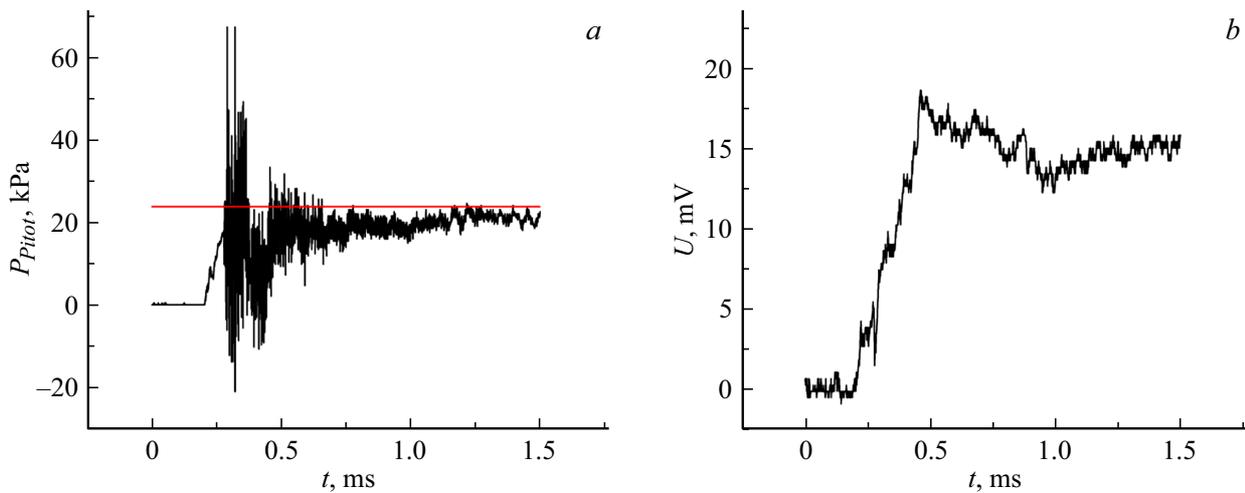


Рис. 5. Влияние твердых частиц лавсановой диафрагмы на сигналы датчика давления (а) и теплового датчика (б). Число Маха потока $M = 6.1$, давление 0.65 kPa , температура 492 K . Красной горизонтальной линией показано полное давление в критической точке, рассчитанное по одномерной модели.

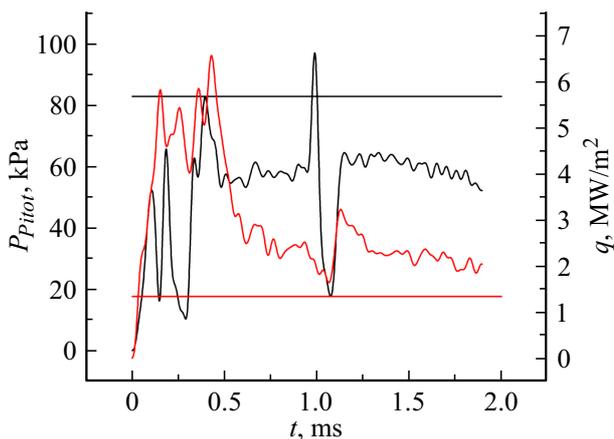


Рис. 6. Измеренное давление (черная кривая) и тепловой поток (красная кривая). Черной горизонтальной линией показано полное давление в критической точке, рассчитанное по одномерной модели, красной — тепловой поток при невозмущенном обтекании, рассчитанный по теории Фей–Ридделла [28]. Число Маха потока $M = 6.6$, давление 1.37 kPa , температура 304 K .

Наблюдаются осцилляции измеряемых величин, уровень которых для давления достигает порядка самого давления, а для теплового потока может превышать его в несколько раз. Такое поведение давления и теплового потока качественно согласуется с результатами численного моделирования движения крупных частиц в ударном слое в полномасштабной трехмерной постановке на основе бессеточного метода решения системы уравнений газовой динамики [10–114]. Достичь количественного совпадения результатов расчета и эксперимента не представляется возможным в силу неконтролируемости процесса разрыва диафрагмы на входе в сопло

и отсутствия информации о количестве и размерах образующихся при разрыве фрагментов диафрагмы.

Таким образом, при использовании лавсановой диафрагмы на входе в сопло наблюдается сильное влияние ее фрагментов в потоке на течение вблизи критической точки. Важность этой проблемы возрастает с учетом ограниченного времени работы импульсной установки, поскольку характерная длительность провалов в сигнале датчика давления может составлять сотни микросекунд при суммарном времени существования квазистационарного обтекания с требуемыми параметрами, не превышающем 1 ms . По этой причине необходим поиск технических решений, способствующих решению этой проблемы. Одним из возможных путей решения является использование диафрагм из другого материала. В настоящей работе использовались полиэтиленовые диафрагмы с толщинами 5 и $10 \mu\text{m}$. Выбор полиэтилена в качестве альтернативы лавсану обусловлен его большей эластичностью — фрагментация полиэтиленовой диафрагмы происходит с образованием меньшего количества осколков по сравнению с лавсановой диафрагмой. Как следствие, вероятность попадания крупных фрагментов диафрагмы в высокоскоростной поток и искажения ударно-волновой картины обтекания модели существенно уменьшается.

На рис. 7 приведены результаты исследования обтекания затупленного тела при использовании полиэтиленовой диафрагмы толщиной $5 \mu\text{m}$. На рис. 7, а заметны небольшие возмущения фронта головной ударной волны. Соответствующее им изменение давления на поверхности модели отражается в виде провала длительностью порядка $150 \mu\text{s}$ в районе $t = 1000 \mu\text{s}$ на рис. 7, б. При этом средний уровень давления в процессе обтекания находится в хорошем согласии с расчетом по одномерной модели. Как и в случае

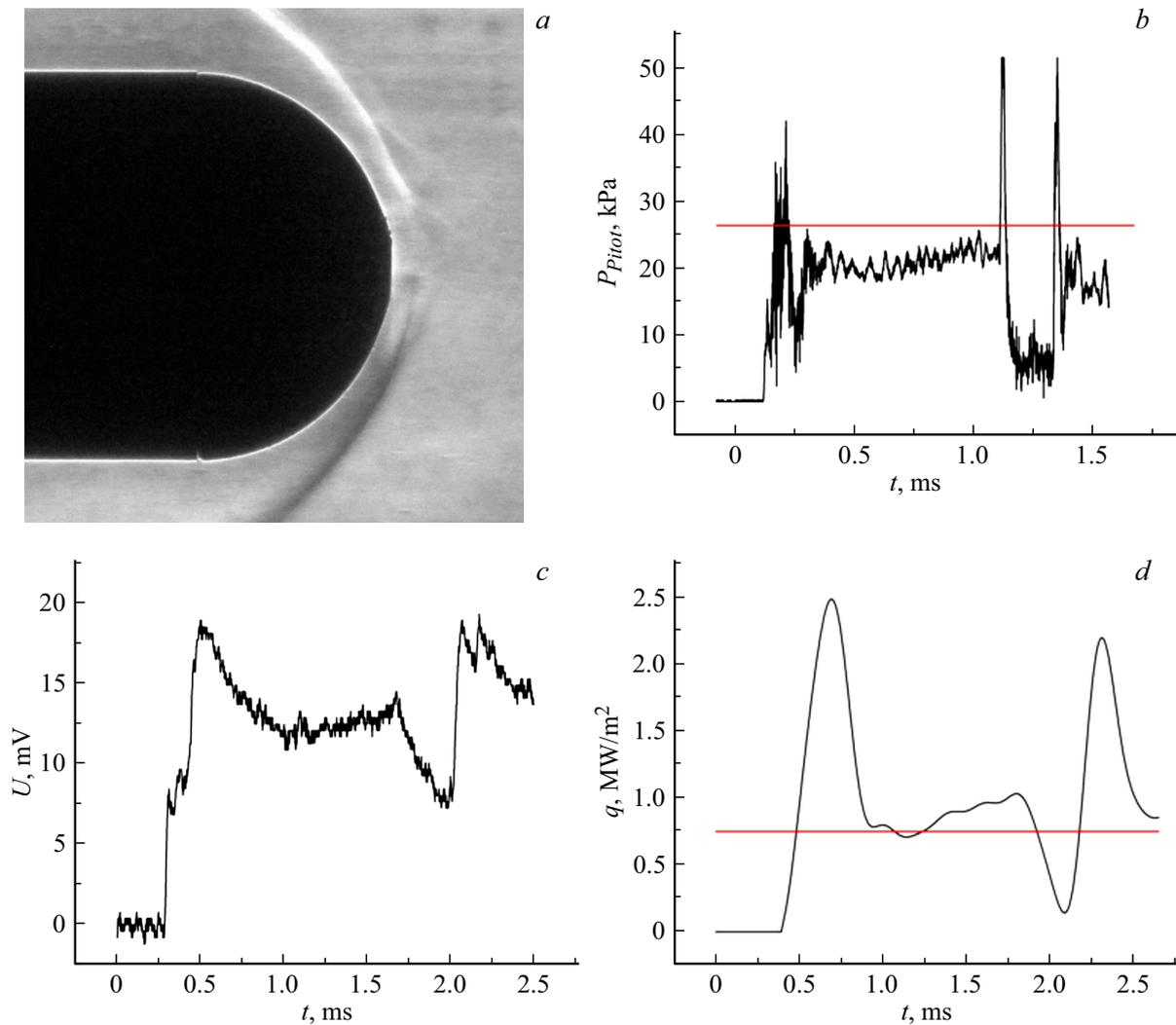


Рис. 7. Результаты исследования обтекания затупленного тела при использовании полиэтиленовой диафрагмы толщиной $5 \mu\text{m}$; *a* — теневая картина обтекания в момент времени $t = 1 \text{ ms}$ от начала разрушения диафрагмы на входе в сопло; *b* — измеренное вблизи критической точки модели давление; *c* — сигнал ГДТП; *d* — тепловой поток в критической точке модели, полученный с помощью обработки сигнала ГДТП. Число Маха потока $M = 6.4$, давление 0.51 kPa , температура 310 K . Красными горизонтальными линиями показаны полное давление в критической точке, рассчитанное по одномерной модели, и тепловой поток, рассчитанный по теории Фей–Ридделла [28].

использования лавсановых диафрагм (рис. 6), влияние фрагментов полиэтиленовой диафрагмы на структуру течения приводит к одновременным резким изменениям давления (рис. 7, *b*) и теплового потока (рис. 7, *d*). Амплитуды этих изменений сопоставимы с невозмущенными значениями этих величин, соответствующими участку квазистационарного обтекания модели.

На рис. 8 приведены результаты исследования обтекания затупленного тела при использовании более толстой полиэтиленовой диафрагмы толщиной $10 \mu\text{m}$. На теневой картине обтекания (рис. 8, *a*) видно, что фронт головной ударной волны гладкий. Относительный уровень осцилляций сигнала датчика давления (рис. 8, *b*) не превышает 20%, при этом наблюдается постоянство давления в течение всего рабочего вре-

мени ударной трубы ($1 \text{ ms} < t < 2 \text{ ms}$). Небольшое (не более 15%) отличие экспериментального уровня давления от предсказанного одномерным расчетом, по-видимому, обусловлено погрешностью определения параметров газа на входе в сверхзвуковое сопло, а также влиянием вязкости на течение в сопле. Локальный максимум теплового потока (рис. 8, *d*), обусловленный приходом стартовой ударной волны к обтекаемому затупленному телу, в случае использования толстой полиэтиленовой диафрагмы намного меньше, чем при использовании полиэтиленовой диафрагмы толщиной $5 \mu\text{m}$ (рис. 7, *d*). Это обусловлено отсутствием попадания крупных фрагментов диафрагмы в область течения вблизи критической точки затупленного тела.

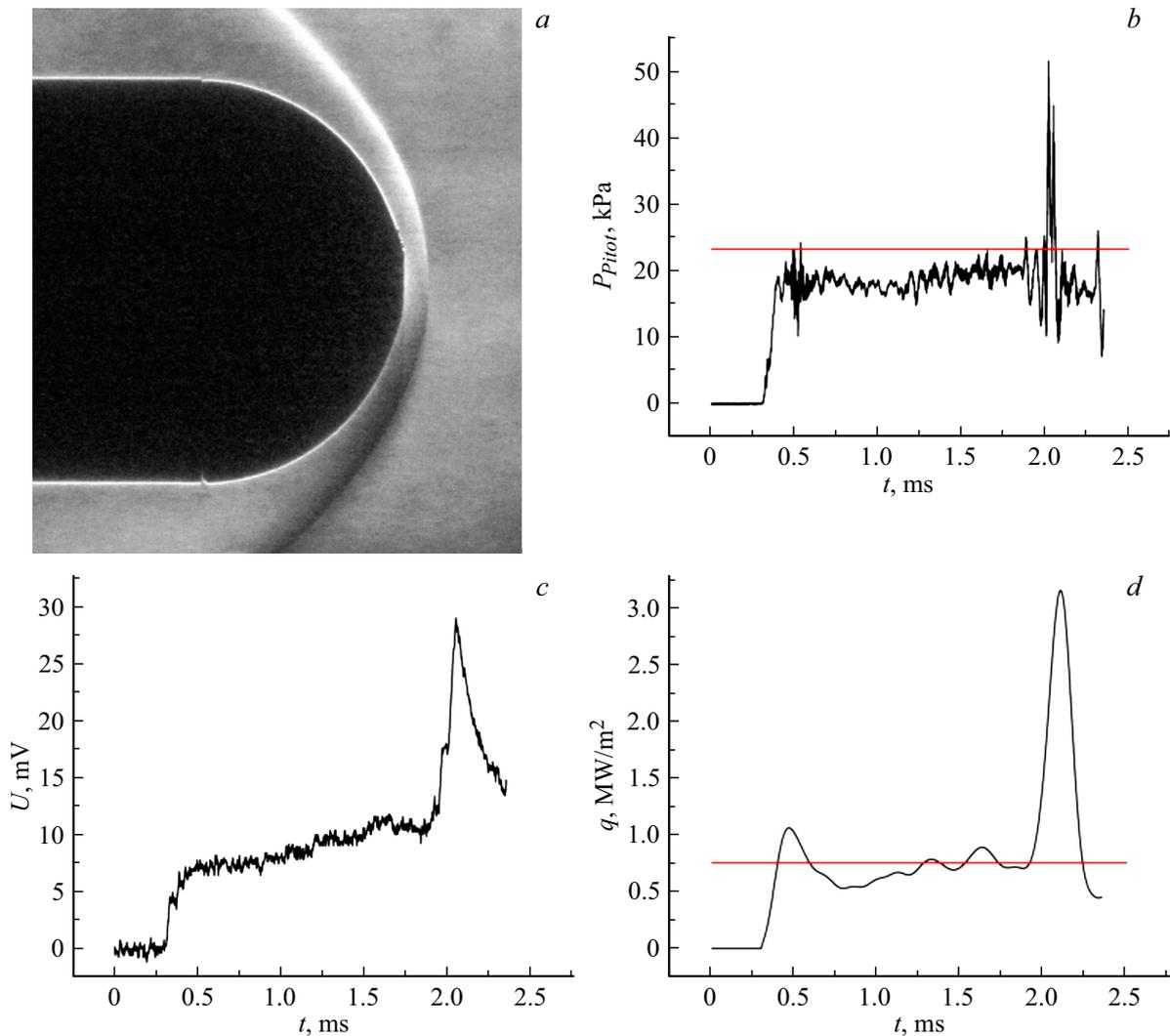


Рис. 8. Результаты исследования обтекания затупленного тела при использовании полиэтиленовой диафрагмы толщиной $10\ \mu\text{m}$; *a* — теневая картина обтекания в момент времени $t = 1\ \text{ms}$ от начала разрушения диафрагмы на входе в сопло; *b* — измеренное вблизи критической точки модели давление; *c* — сигнал ГДТП; *d* — тепловой поток в критической точке модели, полученный с помощью обработки сигнала ГДТП. Число Маха потока $M = 6.4$, давление $0.49\ \text{kPa}$, температура $304\ \text{K}$. Красными горизонтальными линиями показаны полное давление в критической точке, рассчитанное по одномерной модели, и тепловой поток, рассчитанный по теории Фея–Ридделла [28].

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что лавсановые диафрагмы, установленные в критическом сечении сверхзвукового сопла ударной трубы, разрушаются с образованием фрагментов различного размера. Теневые фотографии, а также измерение давления и теплового потока в критической точке затупленного тела показали, что их наличие в потоке газа могут приводить к возникновению газодинамических возмущений вблизи затупленного тела. Установлено, что крупные фрагменты диафрагм, отражаясь от затупленного тела, существенным образом искажают ударно-волновую картину обтекания и показания датчиков давления и теплового потока. Показано, что увеличение температуры газа за

отраженной ударной волной на входе в сопло уменьшает вероятность появления возмущений. Мелкие фрагменты диафрагм приводят к появлению высокочастотного шума на показаниях датчика давления, не изменяя средний уровень его сигнала.

Использование полиэтиленовых диафрагм за счет их большей эластичности позволяет уменьшить количество фрагментов диафрагмы, попадающих в поток. Установлено, что разрушение полиэтиленовой диафрагмы толщиной $5\ \mu\text{m}$ схоже с лавсановой и сопровождается образованием фрагментов различного размера, влияющих на газодинамическую картину обтекания. Разрушение полиэтиленовой диафрагмы толщиной $10\ \mu\text{m}$ приводит к образованию мелких фрагментов, взаимодействие которых с рабочим газом, нагретым отраженной ударной волной,

не приводит к заметному влиянию на высокочастотную составляющую сигнала датчика давления. При этом существенно улучшается качество высокоскоростного потока, что также подтверждается результатами теневой диагностики и измерением теплового потока вблизи критической точки затупленного тела.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Reynier. *Progr. Aerospace Sci.*, **85**, 1 (2016). DOI: 10.1016/J.PAEROSCI.2016.04.002
- [2] V.A. Miller, M. Gamba, M.G. Mungal, R.K. Hanson. *AIAA J.*, **52** (2), 451 (2014). DOI: 10.2514/1.J052767
- [3] A.A. Веревкин, Ю.М. Циркунов. *ПМТФ*, **49** (5), 120 (2008). [A.A. Verevkin, Yu.M. Tsirkunov. *J. Appl. Mech. Tech.*, **49** (5), 789 (2008). DOI: 10.1007/s10808-008-0099-y]
- [4] С.В. Панфилов, Д.А. Романюк, Ю.М. Циркунов. *Изв. РАН. МЖТ*, **4**, 64 (2023). DOI: 10.31857/S1024708423600069 [S.V. Panfilov, D.A. Romanyuk, Y.M. Tsirkunov. *Fluid Dyn.*, **58** (4), 569 (2023). DOI: 10.1134/S0015462823600487]
- [5] K.K.N. Anbuselvan, K.P.J. Reddy. *AIAA J.*, **55** (10), 3603 (2017). DOI: 10.2514/1.J055523
- [6] S. Gu, H. Olivier. *Progr. Aerospace Sci.*, **113**, 100607 (2020). DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100607
- [7] Ch.M. James, B. Birch, D.R. Smith, T.G. Cullen, Th. Millard, S. Vella, Yu Liu, R.G. Morgan, N. Stern, D. Buttsworth. (AIAA Paper 2019–3007). *AIAA Aviation 2019 Forum*. DOI: 10.2514/6.2019-3007
- [8] W.A. Fleener, R.H. Watson. *AIAA Paper*, **73**, 761 (1973).
- [9] M.S. Holden, G.Q. Gustafson, G.R. Duryea, L. Hudack. *AIAA Paper*, **76**, 320 (1976).
- [10] Д.Л. Ревизников, А.В. Способин, И.Э. Иванов. *ТВТ*, **56** (6), 908 (2018). DOI: 10.31857/S004036440003569-9 [D.L. Reviznikov, A.V. Sposobin, I.E. Ivanov. *High Temperature*, **56** (6), 884 (2018). DOI: 10.1134/S0018151X18050218]
- [11] А.В. Способин, Д.Л. Ревизников, И.Э. Иванов, И.А. Крюков. *Известия вузов. Авиационная техника*, **4**, 108 (2020).
- [12] Д.Л. Ревизников, А.В. Способин, И.Э. Иванов. *ТВТ*, **58** (6), 901 (2020). DOI: 10.31857/S0040364420060162 [D.L. Reviznikov, A.V. Sposobin, I.E. Ivanov. *High Temperature*, **58** (6), 839 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20060164]
- [13] V. Sposobin, D.L. Reviznikov. *Fluids*, **6** (11), 406 (2021). DOI: 10.3390/fluids6110406
- [14] А.В. Способин. *Труды МАИ*, **125**, 36 (2022).
- [15] T. Alam, R. Kumar. *Rev. Sci. Instrum.*, **92** (3), 031501 (2021). DOI: 10.1063/5.0015932
- [16] H. Knauss, T. Roediger, D.A. Bountin, B.V. Smorodsky, A.A. Maslov, J. Srulijes. *J. Spacecrafts and Rockets*, **46** (2), 255 (2009). DOI: 10.2514/1.32011
- [17] M.A. Kotov, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Y. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malutin, P.A. Popov, S.A. Poniaev, T.A. Lapushkina, N.A. Monakhov, V.A. Sakharov. *Appl. Therm. Eng.*, **195**, 117143 (2021). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117143
- [18] S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov. *Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement: Heat and Mass Transfer* (Springer International Publishing, 2020)
- [19] П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев. *ЖТФ*, **92** (9), 1334 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52924.54-22
- [20] D.M. Rowe. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (CRC Press, 2006)
- [21] П.А. Попов, Н.А. Монахов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, **16** (1.1), 444 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.176 [P.A. Popov, N.A. Monakhov. *St. Petersburg Polytechnic University J. Phys. Mathematics*, **16** (1.1), 444 (2023).]
- [22] В.Г. Масленников, В.А. Сахаров. *ЖТФ*, **67** (11), 88 (1997). [V.G. Maslennikov, V.A. Sakharov. *Tech. Phys.*, **42** (11), 1322 (1997). DOI: 10.1134/1.1258870]
- [23] П.А. Попов, С.В. Бобашев, Б.И. Резников, В.А. Сахаров. *Письма в ЖТФ*, **44** (8), 3 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45960.17036 [P.A. Popov, S.V. Bobashev, B.I. Reznikov, V.A. Sakharov. *Tech. Phys. Lett.*, **44** (4), 316 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018040235]
- [24] П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Р.О. Куракин. *Письма в ЖТФ*, **48** (20), 7 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.20.53688.19297 [P.A. Popov, N.A. Monakhov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.O. Kurakin. *Tech. Phys. Lett.*, **48** (10), 46 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.10.54798.19297]
- [25] S.V. Bobashev, A.V. Erofeev, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.V. Vasil'eva, D.M. Van Wie. *J. Propuls. Power*, **21** (5), 831 (2005). DOI: 10.2514/1.2624
- [26] J.A. Fay, N.H. Kemp. *J. Fluid Mech.*, **21** (4), 659 (1965). DOI: 10.1017/S002211206500040X
- [27] G. Fukushima, T. Tamba, A. Iwakawa, A. Sasoh. *Shock Waves*, **30**, 545 (2020). DOI: 10.1007/s00193-020-00951-2
- [28] J.A. Fay, F.R. Riddell. *J. Aerosp. Sci.*, **5** (25), 73 (1958). DOI: 10.2514/8.7517