

УДК 532.525.6

**В. В. СПЕСИВЦЕВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ДИАГНОСТИКА СИЛОВОГО И ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ**

*Представлены диаграммы давления в зависимости от угла натекания струи при различных удалениях преграды от среза сопла. Выявлены особенности силового воздействия при натекании сверхзвукового потока. При исследованиях теплообмена в качестве эффективной температуры принята действительная температура газа в камере сгорания. Учет потерь на несовершенство процессов проводили при помощи импульсного кпд. Даны рекомендации по проектированию датчика измерения тепловых параметров по обеспечению более раннего наступления в нем регулярной стадии нагрева. Установлена аналогия между силовым и тепловым воздействием струи на преграду, позволяющая упростить контроль и измерение параметров теплообмена на преграде.*

**Ключевые слова:** *сверхзвуковая струя, взаимодействие с преградой, окрестность критической точки, теплообмен и давление на преграде.*

**Принятые условные обозначения**

$Bi = \alpha \ell / \lambda$  – число Био;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\ell$  – характерная толщина датчика;  
 $\lambda$  – теплопроводность материала датчика;  
 $M$  – число Маха;  
 $D$  – диаметр;  
 $X, x = X / D_{кр}$  – координата вдоль оси струи;  
 $F$  – площадь;  
 $p$  – давление газа;  
 $\alpha_{ок}$  – коэффициент избытка окислителя;  
 $\beta$  – расходный комплекс;  
 $\varphi_{\beta}$  – импульсный кпд;  
 $\eta$  – энергетический кпд;  
 $T$  – температура абсолютная;  
 $\vartheta$  – избыточная температура;  
 $\tau$  – время;  
 $\delta$  – угол натекания;  
 $m$  – темп нагрева.

**Индексы**

$w$  – параметры на преграде;  
 $k$  – камера сгорания;  
 $e$  – эффективное значение;  
 $кр$  – критическое сечение;  
 $t$  – теоретическое значение;  
 $ок$  – окислитель;  
 $г$  – горючее;  
 $d$  – действительное значение.

**Введение**

Сверхзвуковые струи горячего газа широко используются при испытаниях теплозащитных материалов летательных аппаратов, испытаниях элементов их конструкций и стартовых установок, подверженных воздействию высоких тепло- и газодинамических нагрузок.

Основной метод определения указанных нагрузок – экспериментальный. Наибольшую трудоемкость представляет опытное определение параметров теплообмена [1]. Целью статьи является нахождение способов ее уменьшения.

Наиболее полно характеризуют взаимодействие параметры, измеренные в окрестности критической точки на преграде.

**1. Измерение давления на преграде**

При натекании на преграду сверхзвукового участка струи в поле ее течения перед преградой образуется сложная система скачков уплотнения, которая очень сильно влияет на изменение параметров газа на преграде. В целях выявления этих особенностей применена регистрация измеренного воздействующего давления в виде непрерывной диаграммы в зависимости от положения преграды. Такая схема измерений исключает появление погрешностей дискретизации.

Генератором горячей газовой струи служит (рис. 1) камера сгорания ракетного типа 1, жестко закрепленная на станине 7.

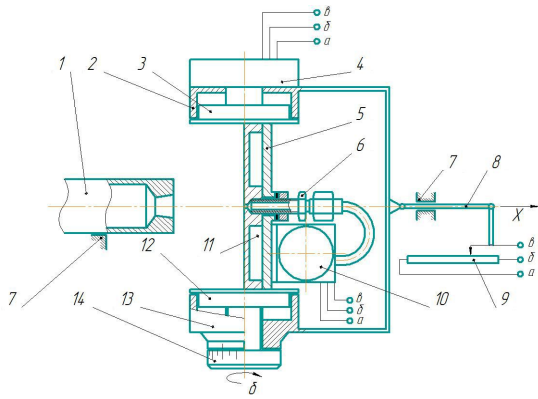


Рис.1. Схема приемника давления

На координатном устройстве установлен приемник давления, представляющий собой плоскую полированную пластину 5 из жаропрочной стали. В центральной ее части просверлено приемное отверстие для забора давления. Пластина имеет полость 11 для протока охлаждающей воды. На нерабочей стороне пластины имеется штуцер 6 для отбора давления. К штуцеру присоединен потенциометрический датчик давления 10, закрепленный здесь же на пластине. Приемная пластина с датчиком прикреплена эксцентрично к торцевым поверхностям дисков 3 и 12, которые установлены в подшипниковых опорах 2 и 13. Ось вращения приемной пластины в шарнирных опорах лежит в плоскости этой пластины. Таким образом, при изменении угла поворота последней расстояние от среза сопла камеры сгорания до приемного отверстия остается постоянным. Шарнирные опоры жестко закреплены на координатном столе. Стол перемещается относительно станины вдоль оси сопла генератора струи по направляющей 8, изменяя расстояние от среза сопла до преграды. Для получения электрических сигналов по положению преграды относительно струи предусмотрены потенциометры 4 и 9. Для градуировки канала измерения углового положения приемной пластины на диске 12 имеется лимб 14.

В целях получения зависимости давления от расстояния преграды до среза сопла или угла натекания струи в измерительную систему включались потенциометр датчика давления и соответствующий потенциометр положения преграды 4 или 9.

Измерительная система регистрировала измеряемые параметры в виде диаграммы. На рис.2 приведены такие диаграммы изменения давления в зависимости от угла атаки при двух удалениях преграды от среза сопла:  $x = 7,0$  и  $x = 13,0$ . В первом случае удаление соответствует сечению на оси свободной струи, где скорость газа сверхзвуковая ( $M = 1,2$ ), а второе удаление –  $M = 1,04$ . Компоненты топлива: «бензин + воздух»,  $p_k = 490,5$  кПа (5,0

кг/см<sup>2</sup>),  $\alpha_{ок} = 1,20$ ,  $d_{кр} = 12$  мм. При натекании сверхзвукового участка струи перед преградой в потоке газа устанавливается скачок уплотнения, интенсивность которого увеличивается с возрастанием угла атаки.

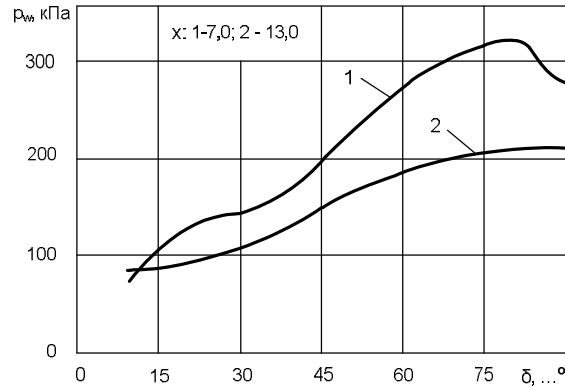


Рис. 2. Диаграммы изменения давления на преграде

Как видно из поведения кривых 1 и 2 при изменении угла атаки на характер изменения давления очень сильно влияет число Маха набегающего потока. Небольшое его изменение приводит к появлению локальных потерь и перегибам кривой давления. Максимальные потери полного давления имеют место в прямом скачке при ортогональном угле встречи струи с преградой (см. рис. 2,  $x = 7,0$ ,  $\delta = 90^0$ ).

## 2. Определение эффективной температуры газа

В случае размещения датчика теплового потока в окрестности критической точки эффективная температура равна полной температуре внешнего потока и равна действительной температуре газа в камере сгорания. Она может быть определена по теоретической температуре горения с учетом потерь на несовершенство процессов в камере сгорания. Относительный внутренний КПД камеры [2] легко определяется при использовании значений режимных параметров камеры сгорания, которые в опыте все равно приходится контролировать.

В опыте контролируют давление в камере сгорания, расходы топливных компонентов: окислителя ( $\dot{m}_{ок}$ ) и горючего ( $\dot{m}_Г$ ). Известен диаметр критического сечения сопла.

По справочнику [3] находят теоретическую температуру горения ( $T_k$ ) и теоретическое значение расходного комплекса для заданных значений давления в камере и  $\alpha_{ок}$ . Коэффициент избытка окислителя определяют по формуле

$$\alpha_{ок} = \frac{\dot{m}_{ок} / \dot{m}_Г}{K_{мо}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{мо}}$  - стехиометрическое соотношение компонентов топлива.

По известным параметрам определяют действительное значение расходного комплекса

$$\beta_{\text{д}} = \frac{P_{\text{к}} F_{\text{кр}}}{\dot{m}_{\text{ок}} + \dot{m}_{\text{г}}}. \quad (2)$$

Коэффициент импульсных потерь в камере вычисляют по формуле

$$\varphi_{\beta} = \beta_{\text{д}} / \beta_{\text{T}}. \quad (3)$$

Энергетический коэффициент потерь в камере сгорания определяют по формуле

$$\eta = \varphi_{\beta}^2. \quad (4)$$

Учитывая вышеизложенные обстоятельства, определяют эффективную температуру газа, которая равна действительной температуре в камере с учетом энергетических потерь

$$T_{\text{е}} = T_{\text{к}} \eta. \quad (5)$$

### 3. Определение параметров теплообмена

Экспериментальное измерение параметров теплообмена сверхзвуковой струи с преградой затруднено главным образом высокой температурой теплоносителя, наличием мощных пульсаций, определяющих высокую интенсивность процесса. Специальный датчик калориметрического типа временно подвергается исследуемому тепловому воздействию. При этом регистрируется перегрев его чувствительного элемента, калориметрической массы (КМ), при помощи термопары, присоединенной чаще всего в точке, соответствующей среднеобъемной температуре. Методика основана на нестационарном тепловом режиме. Эффективную температуру находят предельной экстраполяцией кривой разогрева КМ [4], а параметры теплообмена определяют в регулярной стадии по темпу нагрева. Наибольшую трудность представляет определение момента наступления регулярного режима.

Принцип работы таких датчиков основан на решении задачи теплопроводности в безграничной пластине, которая подвергается нагреву в среде с постоянной температурой и постоянным коэффициентом теплоотдачи на ее поверхности. Решение представляется в виде бесконечного ряда [5].

Если аппроксимировать это решение одним членом ряда, то изменение избыточной температуры в теле пластины запишется уравнением

$$\vartheta = A U e^{-m\tau}. \quad (6)$$

При такой аппроксимации темп нагрева  $m$  в каждый момент времени будет иметь какое-то усредненное значение по бесконечному ряду.

Согласно определению темп нагрева записыва-

ется следующим выражением

$$m = \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}. \quad (7)$$

Применительно к тепловой схеме КМ датчика из баланса теплоты, переданной и накопленной в КМ темп можно записать в виде уравнения.

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = - \frac{\vartheta_{\text{F}}}{\vartheta_{\text{V}}} \frac{\alpha F}{c \rho V}, \quad (8)$$

где  $c$ ,  $\rho$ ,  $V$ ,  $F$  – удельная теплоемкость, плотность, объем и рабочая поверхность КМ,  $\vartheta_{\text{F}}$  – средняя температура рабочей поверхности КМ,  $\vartheta_{\text{V}}$  – среднеобъемная температура.

Обычно выделяют две основные стадии нагрева тела. Первую неупорядоченную и вторую регулярную. Опираясь уравнением вида (6), можно установить границу между этими стадиями.

После разделения переменных и интегрирования уравнения (8) получим

$$\ln \vartheta_{\text{V}} = - \frac{\vartheta_{\text{F}}}{\vartheta_{\text{V}}} \frac{\alpha F}{c \rho V} \tau + C_1. \quad (9)$$

Эту зависимость можно было получить логарифмированием уравнения (6), однако тогда будет скрыто влияние составляющих темпа нагрева.

На первой стадии значения функции (9) убывают нелинейно за счет изменения соотношения  $\vartheta_{\text{F}} / \vartheta_{\text{V}}$ . Вторая стадия характеризуется линейной зависимостью  $\ln \vartheta$  от  $\tau$ . Только в случае  $\vartheta_{\text{F}} = \vartheta_{\text{V}}$ , темп нагрева постоянен, и этот режим нагрева соответствует регулярной стадии.

При решении задачи теплопроводности равенство усредненных по поверхности и объему температур получают при условии, когда  $Bi \rightarrow 0$ . В работе [5] указывается, что практически это равенство достигается в случае  $Bi < 0,1$ . При таком условии сокращается время неупорядоченной стадии нагрева.

При проектировании датчика это может быть достигнуто выбором материала с высокой теплопроводностью и малой характерной толщиной КМ (см. число Био).

При кратковременном нагреве датчика под воздействием струи регистрируется температура КМ во времени в виде кривой разогрева.

Рассмотрим возможные способы ее обработки. При известной эффективной температуре газа методика упрощается, а точность измерения параметров теплообмена может быть повышена. Предлагаемые способы используют уравнения (8) или (9) при условии допущении, что  $\vartheta_{\text{F}} = \vartheta_{\text{V}}$ .

Способ первый. Имеется диаграмма кривой разогрева КМ датчика. Выбирают несколько точек на диаграмме ближе к концу процесса. Проводят кас-

тельную к кривой в каждой точке. В соответствии с масштабами записи температуры и времени определяют температуру КМ и тангенс угла наклона касательной к оси  $\tau$  в каждой выбранной точке в виде отношения  $\Delta T / \Delta \tau$ . Избыточные температуры КМ относительно эффективной температуры газа определим из соотношения

$$\vartheta_i = T_e - T_i. \quad (10)$$

По уравнению (8) определяют значения  $\alpha$  и строят график в зависимости от времени. При достижении постоянства  $\alpha$  процесс обработки диаграммы заканчивают. Постоянство коэффициента теплоотдачи соответствует моменту достижения равенства  $\vartheta_F = \vartheta_V$  или достаточной их близости.

Способ второй. Имеется возможность аппаратного получения производной от кривой разогрева и программной обработки полученных сигналов. Как и в первом способе по уравнению (8) определяют зависимость коэффициента  $\alpha$  во времени. Когда коэффициент принимает постоянное значение или изменяется в допустимых пределах согласно заданной точности, эксперимент заканчивают.

Способ третий. Используют из диаграммы только значения температур и моментов времени. Разбивают диаграмму на несколько небольших участков. На каждом участке определяют усредненное значение  $\alpha$  следующим образом. Для концов участка на диаграмме определяют моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , находят соответствующие температуры КМ  $T_1$  и  $T_2$ . Определяют избыточные температуры по уравнению (10). После поочередной подстановки параметров этих точек в уравнение (9) получим два алгебраических уравнения, содержащих искомую величину  $\alpha$ . При совместном решении этих уравнений найдем выражение для определения коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\left(\frac{\tau_1}{c_1}\right) - \left(\frac{\tau_2}{c_2}\right)} \frac{\rho V}{F}. \quad (11)$$

Процесс обработки диаграммы заканчивают, когда достигают постоянства значений  $\alpha$ .

Уравнение (11) предусматривает учет изменения удельной теплоемкости КМ за время разогрева.

На рис. 3 приведены результаты измерений коэффициента теплоотдачи в окрестности критической точки при натекании на преграду струи продуктов сгорания топлива «бензин + воздух» при тех же условиях, что и при диагностике давления (см. рис. 2).

Кривая коэффициента теплоотдачи повторяет особенности изменения давления при соответствующих углах встречи и числах Маха набегающего сверхзвукового потока.

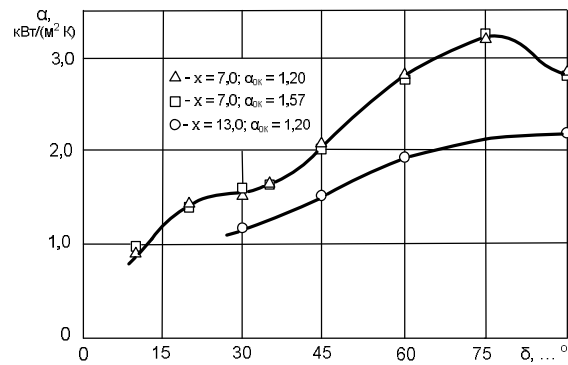


Рис. 3. Влияние угла натекания сверхзвуковой струи на коэффициент теплоотдачи в преграду

При удалении преграды  $x = 7,0$  дополнительно были проведены исследования коэффициента теплоотдачи при другой температуре газа ( $\alpha_{ок} = 1,57$ ).

#### 4. Синтез исследований силовых и тепловых воздействий струи на преграду

Совместное рассмотрение кривых, представленных на рис. 2 и рис. 3, позволяет сделать вывод об их аналогичности. Отношение значений одного графика к значениям другого при соответствующих параметрах условий взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой сохраняется постоянным.

Таким образом, в критической точке имеет место аналогия между двумя видами воздействия струи на преграду. Эту аналогию можно выразить зависимостью

$$c_w = \frac{\alpha}{p_w}, \quad (12)$$

где  $c_w$ , Вт/(Н К) – коэффициент пропорциональности между величиной давления, создаваемого струей на преграду, и значением коэффициента теплоотдачи от струи в преграду.

Эта аналогия сохраняется во всем сверхзвуковом участке струи при различных условиях взаимодействия ее с преградой: расстояния до среза сопла и угла ее натекания.

Аналогия сохраняется также при различных температурах теплоносителя. Это обстоятельство позволяет проводить аттестацию теплообменных характеристик струи (для определения значений коэффициента  $c_w$ ) при более низких температурах газа в струе, что значительно упрощает эксперимент и значительно снижает его трудоемкость.

Для повышения точности создания тепловых нагрузок при испытаниях достаточно контролировать величину давления газа на преграде перед началом теплового воздействия на объект и после

окончания эксперимента путем переключения воздействия струи с приемника давления на объект и обратно при сохранении условий взаимодействия.

### Выводы

1. Измерение давления на преграде предпочтительно определять в виде непрерывных функций от ее координаты в целях исключения погрешностей дискретизации.

2. Эффективную температуру газа следует определять по режимным параметрам камеры сгорания генератора газовой струи.

3. В целях более раннего наступления регулярной стадии нагрева в эксперименте, материал и характерный размер КМ при конструировании датчика следует выбирать с учетом ожидаемого коэффициента теплоотдачи из условия  $Bi < 0,1$ .

4. Установлена аналогия между силовым и тепловым воздействием струи на преграду, позволяющая упростить контроль и измерение параметров теплообмена.

*Поступила в редакцию 26.05.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015*

## ДІАГНОСТИКА СИЛОВОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ ДІЇ НАДЗВУКОВОГО СТРУМІНЯ НА ПЕРЕПОНУ

**В. В. Спесивцев**

Подано діаграми тиску в залежності від кута натікання струмня при різних віддаленнях перепони від зрізу сопла. Виявлено особливості силової дії при натіканні надзвукового струмня. При дослідженнях теплообміну в якості ефективної температури прийнято дійсну температуру газу в камері згорання. Облік збитку у зв'язку з недосконалістю процесів здійснювали за допомогою імпульсного ккд. Видано рекомендації щодо проектування вимірювача теплових параметрів по забезпеченню більш раннього наступу у ньому регулярної стадії нагріву. Встановлено аналогію між силовою та тепловою дією струмня на перепону, яка дозволяє спростити контроль та вимірювання параметрів теплообміну на перепоні.

**Ключові слова:** надзвуковий струмінь, взаємодія з перепонною, місцевість критичної точки, теплообмін та тиск на перепоні.

## DIAGNOSTICS OF POWER AND HEAT IMPACT OF SUPERSONIC JET ON BARRIER

**V. V. Spesivtsev**

The pressure diagrams depending on angle of jet's leaking at different distances of barrier from nozzle exit section have been offered. The features of power impact under leaking of supersonic flow have been revealed. As an effective temperature in heat-exchange researches the real one in combustion chamber has been supposed. The accounting of loss of process imperfection was carried out by means of impulse efficiency factor. The recommendations for the assurance of the more early coming of regular stage of heating under designing of sensor of the heat parameters measuring have been made. The analogy between power and heat impact of jet on barrier permitting to simplify the testing and measuring of heat-exchange parameters on barrier has been ascertained.

**Keywords:** supersonic jet, interaction with barrier, neighborhood of critical point, heat-exchange and pressure on barrier.

**Спесивцев Виктор Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## Литература

1. Полежаев, Ю. В. Тепловое разрушение материалов [Текст] / Ю. В. Полежаев, Г. А. Фролов. – Киев : ИД «Академперіодика», 2006. – 336 с.

2. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалін, А. П. Тишин. – М. : Машиностроение, 1980. – 535 с.

3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалін, А. П. Тишин и др., справочник в 10 томах. – М. : АН СССР, ВИНТИ, 1971 - 1980.

4. К исследованию теплообмена при натекании высокотемпературного газового потока на плоскую поверхность [Текст] / И. П. Голдаев, В. Ю. Латка, А. П. Першин и др. // Самолетостроение и техника воздушного флота : сб. науч. тр. Харьк. ун-та. – Вып. 32. – X., 1973. – С. 23 - 25.

5. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 417 с.