

УДК 662.76.032:536.253

doi: 10.32620/akt.2019.2.04

В. В. СПЕСИВЦЕВ, Л. Е. СЕРДЮКОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского***ВОЗБУЖДЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В ТВЕРДОМ ОБРАЗЦЕ МАТЕРИАЛА ПРИ КОНВЕКТИВНОМ НАГРЕВЕ**

В статье рассматривается способ и средства возбуждения гармонических температурных волн в твердом образце материала при конвективном нагреве, характерном для условий работы теплонапряженных узлов и деталей в энергетических устройствах. В качестве теплоносителя использована сверхзвуковая струя продуктов сгорания. Рассмотрена схема питания и управления режимом работы газогенератора, позволяющая надежно регулировать режимы его работы и получать стабильные значения температуры теплоносителя. Для определения температуры теплоносителя рассмотрен метод учета потерь в камере сгорания при помощи импульсных коэффициентов. Для создания переменного теплового воздействия использовано свойство сверхзвукового (бочечного) участка, заключающееся в существенной неравномерности распределения газодинамических параметров по его длине. Перемещение образца относительно струи необходимо производить с переменной скоростью. Для определения этой закономерности проведен анализ координат ударно-волновой структуры с целью преобразования ее линейных координат в фазовые. Использовано свойство логарифмической спирали. Установлено, что коэффициент роста логарифмической спирали для первых бочек от среза сопла меняется незначительно. Приведена схема устройства для возбуждения температурной волны в образце. Образец располагают на рабочем столе, который совершает возвратно-поступательные движения относительно струи (используется участок первой половины второй бочки). Привод рабочего стола осуществляется при помощи кулачка, вращающегося с постоянной скоростью. Профиль кулачка выполняют по участкам ветвей спирали (правой и левой), в этом случае давление струи газов на рабочую поверхность изменяется по гармоническому закону. Коэффициент теплоотдачи пропорционален величине давления. Для определения теплофизических характеристик материала в эксперименте достаточно измерить сдвиг фазы между колебаниями температуры второй поверхности образца и колебаниями теплового потока (давления газа на преграде). Точность таких измерений оказывается выше, чем при измерениях параметров при непрерывном нагреве образца.

Ключевые слова: сверхзвуковая струя; генератор струи; ударно-волновая структура, конвективный нагрев; возбуждение температурных волн в образце материала.

Принятые условные обозначения

УВС – ударно-волновая структура струи;
 U – осевая координата выходного сечения бочки от начального сечения УВС;
 X – осевая координата, отсчитанная от среза сопла;
 V – осевой размер бочки;
 D – диаметр сечения струи;
 $u = U/D_0$, $v = V/D_0$, $d = D/D_0$ – относительные величины;
 p – давление газа;
 Пн – располагаемый перепад давлений;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 β – расходный комплекс;
 φ_{β} – импульсный КПД;
 η – энергетический КПД;
 T – температура абсолютная;
 ВМТ, (НМТ) – верхняя (нижняя) мертвая точка.

Индексы

n – номер бочки (целое число), фаза сечения внутри бочки (дробное число);
 n – параметры при давлении окружающей среды;
 o – параметры входного сечения УВС;
 k – параметры в конце сверхзвукового участка струи;
 w – параметры на преграде;
 t – теоретическое значение;
 d – действительное значение.

Введение

Тепловые источники, обеспечивающие в активной зоне образца синусоидальный закон изменения теплового потока во времени, принято называть гармоническими тепловыми источниками. Под воздействием гармонического теплового источника в

образце материала возбуждается температурная волна. Параметры температурной волны определяются такими свойствами вещества, как теплопроводность и теплоемкость. Важным преимуществом гармонических тепловых воздействий является возможность изменять в широком диапазоне частоту колебаний, что существенно расширяет способы выбора оптимальных режимных параметров эксперимента, а также позволяет снизить возмущающее влияние теплообмена боковых поверхностей образца с окружающей средой. В ходе эксперимента удается достаточно просто регистрировать фазовый сдвиг температурных волн во времени, что также создает преимущество, так как главной измеряемой величиной становится время, на сегодняшний день являющееся одной из наиболее точно измеряемых физических величин. Точность таких измерений оказывается выше, чем при измерениях необходимых параметров при непрерывном нагреве образца [1].

Для создания температурной волны используют чаще всего следующие виды периодического нагрева: электронный, фототермический, термоэлектрический и лазерный. Известен также метод с использованием криостата для регулирования средней температуры в образцах и в то же время для создания тепловых волн внутри образцов с использованием следящей системы [2 - 4]. При использовании электронного потока для создания температурной волны источник электронов и исследуемый образец образует вакуумный диод. Существенный недостаток метода – образец должен являться электропроводящим материалом, поэтому данный подход можно использовать только для исследования свойств проводников, работающих в вакууме. В термоэлектрическом методе применяют элемент Пельтье. Диапазон рабочих температур устройства от -150 до $+80$ °С [1]. Основные недостатки лазерного излучения в методе температурных волн – нестабильность выходной мощности при создании излучения, изменяющегося по периодическому закону, отклонение от гармонического закона нагрева. Общий недостаток перечисленных методов заключается в том, что условия эксперимента существенно отличаются от условий работы материалов в конструкциях теплонагруженных элементов энергетического машиностроения, где имеют место высокие температуры, приводящие зачастую к изменению свойств материала в процессе работы.

В статье рассматривается способ и средства возбуждения гармонических температурных волн в твердом образце материала при конвективном нагреве, характерном для условий работы теплонапряженных узлов и деталей в энергетических устройствах.

1. Особенности струйного нагрева

Для испытаний теплозащитных материалов летательных аппаратов и стартовых установок, термического разрушения материалов, испытаний элементов конструкций летательных аппаратов и стартовых установок, подверженных действию высоких тепло- и газодинамических нагрузок, в настоящее время широко используются сверхзвуковые горячие струи.

Интенсивность теплообмена при взаимодействии струй с преградами примерно на порядок выше, чем при других способах подвода теплоносителя к поверхности теплообмена при прочих равных условиях.

В настоящее время горячие струи продуктов сгорания получают при помощи камер сгорания ракетного типа, называемых генераторами струй.

Сложная обстановка в области взаимодействия струи с преградой затрудняет теоретическое определение газодинамических параметров и в некоторых случаях упрощают задачу, например, путем замены струйного потока неограниченным.

В окрестности критической точки на преграде (точка пересечения оси струи с поверхностью теплообмена) наблюдается аналогия между силовым воздействием струи на преграду (струя создает давление), и тепловым ее воздействием (нагревом). Эта аналогия выражается зависимостью [5]

$$c_w = \frac{\alpha}{P_w}, \quad (1)$$

где c_w , Вт/(НК) – коэффициент пропорциональности между величиной давления, создаваемого струей на преграду, и значением коэффициента теплоотдачи от струи в преграду. Экспериментально установлено, что эта аналогия сохраняется во всем сверхзвуковом участке струи при различных условиях взаимодействия ее с преградой. Аналогия сохраняется также при различных температурах теплоносителя.

Таким образом, задача определения параметров теплообмена значительно упрощается, если известно давление, создаваемое струей на преграде. Оно может быть найдено достаточно просто экспериментальным путем.

Вторая особенность сверхзвуковой струи – значительная неравномерность распределения газодинамических параметров вдоль ее оси, которая обусловлена волновой структурой сверхзвукового участка.

Сверхзвуковой участок струи имеет периодическую структуру по длине струи. В случае перемещения нагреваемого тела вдоль оси струи на поверхность теплообмена будет воздействовать пере-

менный тепловой поток, а в теле образца будет возбуждаться температурная волна. При равномерном перемещении преграды вдоль оси струи колебания температуры в теле образца будут иметь периодический характер, но не будут подчинены гармоническому закону.

Учет закономерности изменения параметров УВС позволяет использовать ее для определения координат характерных сечений сверхзвукового участка струи в целях расчета значений газодинамических параметров в этих сечениях и параметров теплообмена при взаимодействии струи с преградой этими сечениями.

2. Координаты УВС в сверхзвуковом участке струи

Для диапазона режимных параметров истечения, соответствующего регулярно отражению волн, разработаны и хорошо согласуются с опытом модели координат УВС сверхзвукового участка струи. В последнее время для расчета располагаемой длины бочки v_0 , которая зависит от отношения давлений на сопле, разработаны две теории. Первая теория – геометрическая, работающая в диапазоне от первого критического режима $P_{H*} = 1/\pi(1)$ до второго критического режима

$P_{H**} = 1/\pi^2(1)$ для сужающихся сопел. Для сопел с раструбом этот режим наступает при располагаемом перепаде давлений $P_{H**} = 1/(\pi(\lambda_a)\pi(1))$. Вторая теория – акустическая работает от второго критического режима до очень больших значений располагаемого отношения давлений на сопле $P_H > 5000$. Акустическая теория хорошо согласуется с экспериментом во всем указанном диапазоне режимных параметров истечения. На рис. 1 изображена структура бочечного участка в общем случае для струи, истекающей из сопла с раструбом. Сечения бочек: (0-0) – входное сечение первой бочки (начало координат УВС), (1-1) – выходное сечение первой бочки (входное сечение второй бочки) и т.д. Рассмотрение такой схемы позволяет получить универсальную модель УВС для струй, истекающих из любых сопел (с раструбом и без раструба). В модели УВС введено понятие виртуальной части первой бочки (касается только сопел с раструбом). Ее длина равна V_a , она расположена между сечениями 0-0 и а-а (см. рис. 1).

Дополнительная (виртуальная) длина первой бочки является эквивалентом действия на струю раструба сопла и учитывает дополнительную часть импульса, создаваемого этой частью сопла.

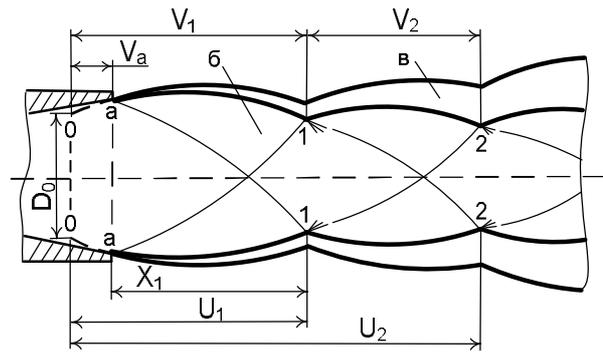


Рис. 1. Схема УВС сверхзвукового участка струи, истекающей из сопла с раструбом: а – срез сопла, б – ядро струи, в – пограничный слой

Длина виртуальной части первой бочки зависит как от степени геометрического расширения сопла, так и от угла наклона стенки сопла к оси струи. В модели УВС входное сечение струи имеет всегда одномерные параметры, а скорость на входе в первую бочку сверхзвуковая $1 < \lambda_0 < \lambda_a$. На схеме (см. рис. 1.) видно, что координаты характерных сечений струи можно отсчитывать как от среза сопла, так и от начального сечения УВС.

В струе, истекающей из сужающегося сопла (без раструба), начало координат УВС совпадает со срезом сопла, а скорость на входе в первую бочку $\lambda_0 = 1$.

На режимах регулярного отражения волн от оси струи координаты УВС подчинены модели

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 + \left(\frac{u}{u_k}\right)^2 = 1. \quad (2)$$

Она связывает осевые размеры бочек с координатами их выходных сечений на оси струи. Эта модель содержит два коэффициента v_0 и u_k (полуоси эллипса), которые могут быть определены экспериментально при обработке координат УВС, полученных с теневых фотографий бочечного участка. Первый коэффициент модели – располагаемая осевая длина бочки, определяется режимом истечения. Второй – длина сверхзвукового участка (координата конца сверхзвукового участка). Отношение полуосей эллипса – коэффициент сжатия эллипса

$$k_0 = v_0 / u_k. \quad (3)$$

Уравнение (2) с учетом (3) приобретает вид

$$\left(\frac{v}{k_0}\right)^2 + u^2 = u_k^2. \quad (4)$$

Полученное уравнение – окружность радиуса $u_k = \frac{v_0}{k_0}$, на которой находятся точки с координатами

тами $\frac{v_n}{k_0}$ и u_n (рис. 2).

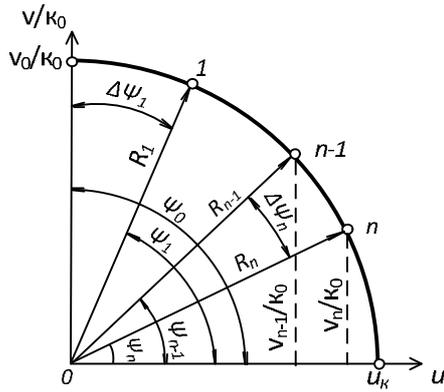


Рис. 2. Модель УВС сверхзвукового участка струи

Радиус-векторы, проведенные из начала координат в эти точки, определяют угловые координаты выходных сечений бочек (сечений узлов) и угловые размеры бочек $\Delta\psi_n$. Связь угловых координат соседних бочек $\Delta\psi_n = \psi_{n-1} - \psi_n$. Отсчет угловых координат бочек ψ_n производится от оси абсцисс. В этой модели угловые характеристики связаны с коэффициентом сжатия эллипса уравнением

$$k_0 = \frac{\cos(\psi_{n-1} - \Delta\psi_n) - \cos\psi_{n-1}}{\sin(\psi_{n-1} - \Delta\psi_n)}. \quad (5)$$

Угловой размер первой бочки (для $n = 1$, $\psi_0 = \pi/2$) получим из уравнения (5)

$$\Delta\psi_1 = \arctg k_0. \quad (6)$$

Уравнение (5) определяет однозначную связь коэффициента сжатия эллипса с размером соответствующей бочки и ее координатой на оси струи и является рекуррентной формулой, так как для вычисления угловых координат последующей бочки используются координаты предыдущей. По известным значениям ψ_n находят осевую длину бочки с номером n (n – целое число) и координату ее выходного сечения на оси струи:

$$v_n = v_0 \sin \psi_n, \quad (7)$$

$$u_n = u_k \cos \psi_n. \quad (8)$$

3. Распределение давления вдоль оси бочки

Как указывалось выше, в сверхзвуковом участке параметры газа под действием УВС изменяются периодически. При движении газа на участке одной бочки (от входного к выходному сечению) происходит цикл изменения его параметров. На входе в бочку давление имеет максимальное значение, в сере-

динном сечении бочки давление газа минимальное (скорость принимает максимальное значение), в выходном сечении скорость опять принимает максимальное значение. Для описания изменения параметров газа по длине бочки можем использовать гармонические функции. Каждому поперечному сечению бочки соответствует определенная фаза течения газа в струе. А само это сечение можно характеризовать фазой n , принимающей значения от 0 до 1.

Тогда изменение избыточного давления газа в сечениях бочки по ее длине можно записать гармонической функцией

$$\frac{p - p_n}{p_0 - p_n} = \cos 2\pi n. \quad (9)$$

В реальных условиях, за счет смещения струи с окружающим пространством, нарушается симметричность бочки относительно срединного сечения, а, следовательно, искажается гармонический закон. Для реализации гармонического изменения давления, создаваемого струей на преграде необходимо обеспечить перемещение преграды, компенсируя искажений гармонического закона. Для этого необходимо перемещать ее вдоль струй с переменной скоростью с учетом закономерностей изменения УВС.

4. Устройство для компенсации искажений гармонического закона

Применяем кулачковый механизм. Профиль кулачка должен обеспечить закон перемещения с заданным изменением скорости с учетом закона изменения координат УВС в пределах одной бочки при равномерном вращении кулачка.

Таким требованиям может отвечать профиль, выполненный по логарифмической спирали

$$\rho = \rho_0 q^{\frac{\delta}{2\pi}}, \quad (10)$$

где δ – угол поворота радиус-вектора, q – коэффициент роста логарифмической спирали, ρ_0 – расстояние от фокуса спирали до выбранной исходной точки.

Если поместить конец сверхзвукового участка струи в фокус спирали (координата УВС U_k), то координаты пересечения спирали с числовой осью при повороте радиус-вектора на 2π , будут соответствовать координатам выходных сечений бочек на оси струи. При повороте радиус-вектора на угол $\delta = 0 \dots 2\pi$ радиус ρ соответствует координатам промежуточных сечений бочки с фазой n . Тогда $\delta = 2\pi n$ (см. уравнение (10)). Если за один полный оборот радиус-вектора его длина изменяется на

длину бочки с номером n . При повороте радиус-вектора на угол π , его длина соответствует координате срединного сечения бочки на оси струи $U_{n+0,5}$. Координаты отсчитываются от полюса логарифмической спирали.

Проведен расчет коэффициента роста логарифмической спирали для координат УВС струи. Изменение коэффициента роста логарифмической спирали, для координат УВС сверхзвуковой струи в зависимости от номера бочки, представлено на рис. 3. Расчет проведен для координат УВС струи воздуха, истекающей из сопла $f_a = 1,0$ диаметром 25,0 мм при располагаемом перепаде давлений на сопле $P_n = 2,644$.

Как видно из графика, коэффициент роста спирали по длине УВС струи переменный. В пределах одной бочки он изменяется незначительно, особенно для первых бочек за соплом.

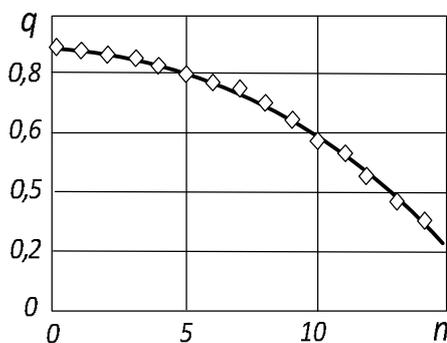


Рис. 3. Изменения коэффициента роста логарифмической спирали для координат УВС в зависимости от номера бочки

Учитывая это обстоятельство, для воздействия струи на образец синусоидальным давлением рационально выбрать участок струи и наименьшим изменением коэффициента q . Например, (см. рис. 3) участок второй бочки от сечения $n=1$ (ВМТ) до сечения $n=1,5$ (НМТ). А профиль кулачка для обеспечения возвратно-поступательного движения представить в виде двух ветвей логарифмической спирали (правой и левой).

Если выбрать за исходное положение для взаимодействия струи с рабочей поверхностью выходное сечение бочки с номером $n-1$, то приращение (уменьшение) радиуса кулачка запишем уравнением

$$\Delta R = (U_k - U_{n-1}) \left(1 - q^{\frac{\delta}{2\pi}}\right), \quad (11)$$

где $q = (U_k - U_n) / (U_k - U_{n-1})$, δ – угол поворота кулачка.

Итак, профиль кулачка будет образован идентичными двумя участками правой и левой логарифмической спирали по уравнению (11). При вращении кулачка за первую половину оборота преграда движется от НМТ к ВМТ под воздействием профиля левой спирали, а при дальнейшем вращении кулачка преграда перемещается в обратном направлении под действием правой спирали. Эти спирали симметричны.

5. Установка для возбуждения гармонической температурной волны

Установка должна обеспечить стабильность и контролируемость режимных параметров камеры сгорания генератора, возможность широкого регулирования ее режимов. Кроме того, необходима надежная отсечка струи в рабочей зоне, простота и надежность обеспечения заданных геометрических характеристик взаимодействия струи с поверхностью образца, простота управления.

В качестве примера рассмотрим камеру сгорания, которая работает на топливных компонентах «керосин+воздух». Горючее в камеру подают путем вытеснения из бака сжатым воздухом от редуктора давления. Сжатый воздух от компрессора через расходомер и дроссель поступает в генератор.

Использование отдельного источника сжатого воздуха позволяет устойчиво регулировать режимы работы камеры сгорания в широком диапазоне. Давление подачи горючего на всех режимах работы камеры сгорания поддерживается постоянным и контролируется.

В камере применено регенеративное охлаждение, поэтому потери тепла на охлаждение отсутствуют, что повышает точность определения параметров теплоносителя. Давление сгорания регистрируется манометром, установленным на входе в сопло, что снижает погрешности определения режима работы генератора, связанные с гидравлическими потерями в камере сгорания. Величина измеренного давления используется при расчете температуры теплоносителя.

Эффективную температуру теплоносителя определяют, используя метод импульсных коэффициентов.

Коэффициент импульсных потерь в камере вычисляют по формуле

$$\varphi_\beta = \beta_d / \beta_T. \quad (12)$$

После чего вычисляют энергетический коэффициент потерь в камере сгорания по формуле

$$\eta = \varphi_\beta^2. \quad (13)$$

Далее определяют температуру газа, которая

равна действительной температуре в камере с учетом энергетических потерь

$$T_d = T_{кп}. \quad (14)$$

На рис. 5 показана схема установки для возбуждения температурной волны в образце материала [6].

Генератор сверхзвуковой газовой струи 1, установленный на маятниковом подвесе 2. Генератор имеет возможность осевого перемещения относительно маятникового подвеса с последующей фиксацией на нем с помощью крепления 4. Маятниковый подвес имеет шарнирную связь со стойкой 5, обеспечивающую возможность качания генератора струи под действием привода 6 для занятия двух положений: рабочего и положения для запуска генератора и выведения на заданный режим работы.

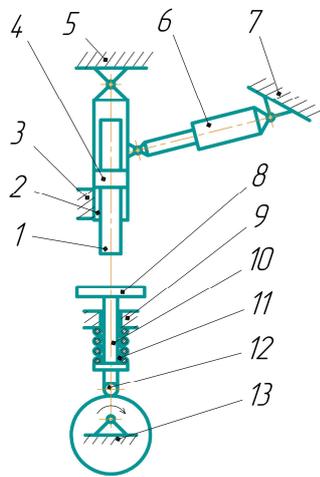


Рис. 5. Схема установки для возбуждения гармонических температурных волн в образце материала

Привод шарнирно связан со стойкой 7 и с маятниковым подвесом. В рабочем положении маятниковый подвес взаимодействует с упором 3 стойки для строгой фиксации генератора относительно предметного стола 8 так, чтобы сверхзвуковая струя, истекающая из сопла генератора вдоль оси, взаимодействовала с поверхностью предметного стола под прямым углом. Предметный стол скреплен со штоком 10 и имеет возможность возвратно-поступательных перемещений вдоль оси струи в направляющих 9 стойки под действием кулачка 12 и пружины 11. Поверхность стола служит для размещения на нем образца (образец не показан). Свободный конец штока имеет кинематическую связь с поверхностью кулачка. Ось кулачка закреплена в подшипниковых опорах стойки 13 с возможностью кругового вращения с заданной скоростью под действием привода (привод не показан).

На чертеже положение генератора струи соответствует рабочему состоянию, а рабочий стол занимает положение нижней мертвой точки.

Работа устройства. На предметный стол устанавливают образец в виде системы пластин в соответствии с выбранной тепловой схемой эксперимента. Рабочая поверхность образца должна быть параллельной поверхности рабочего стола. Удаление рабочей поверхности образца от среза сопла генератора струи вдоль оси должно соответствовать удалению входного сечения бочки в струе и соответствовать ВМТ механизма привода стола. При помощи привода 6 маятниковый подвес отводится в положение для запуска генератора (влево). Генератор запускают и выводят на заданный режим работы. После чего включают привод кулачка, устанавливают заданную частоту вращения, включают систему выдачи и регистрации метки положения стола при прохождении ВМТ, систему измерения температур образца материала. В момент нахождения стола в положении ВМТ генератор вводится в рабочее состояние. Струя натекает на образец, взаимодействуя с ним входным сечением бочки. Этот момент соответствует воздействию максимальных значений давления и удельного теплового потока. В положении НМТ струя взаимодействует с образцом максимальным поперечным сечением, что соответствует воздействию минимальных значений давления и удельного теплового потока. В дальнейшем при вращении кулачка давление и тепловой поток возрастают и убывают по гармоническому закону с частотой вращения кулачка. В эксперименте непрерывно регистрируются температура заданных поверхностей образца.

Используя решения задачи теплопроводности для выбранных геометрических характеристик и тепловой схемы образца с граничными условиями третьего рода при гармоническом законе изменения коэффициента теплоотдачи и известной температуре теплоносителя, получают (либо берут готовые) решения о распространении температурных волн. Значения коэффициентов теплопроводности и теплопроводности материала образца определяют по фазовому сдвигу времени между изменяющимся тепловым потоком на поверхности теплообмена и температурой в заданном сечении образца. Главной измеряемой величиной становится время, которое можно измерить с наивысшей точностью. Проводя такие измерения в каждом цикле, можно в одном эксперименте за несколько циклов получить зависимость изменения теплофизических свойств материала от температуры. Частоту колебаний гармонических тепловых воздействий можно изменять в широком диапазоне.

Выводы

1. Приведена схема установки для создания гармонического теплового воздействия на твердый образец материала при конвективном нагреве.
2. Показан метод определения эффективной температуры теплоносителя при теплообмене сверхзвуковой струй с преградой.
3. Проведено сопоставление координат УВС с координатами радиус-векторов логарифмической спирали и разработан закон профилирования (11) механизма привода рабочего стола.

Литература

1. Любимова, Д. А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода [Текст] / Д. А. Любимова, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 80 с.
2. Lybimova, D. Increasing the Precision of Thermal Properties Measurement by the Periodic Heating Method [Text] / D. Lybimova, A. Divin, S. Ponomarev // *Chemical Engineering Transactions*. – 2014. – Vol. 39. – P. 1315 – 1320.
3. Ka'zmiarczак-Balata, A. Determination of Thermal-Diffusivity Dependence on Temperature of Transparent Samples by Thermal Wave Method [Text] / A. Ka'zmiarczак-Balata, J. Bodzenta, D. Trefon-Radziejewska // *International Journal of Thermophysics*. – 2010. – vol. 31. – P. 180-186.
4. Kukulka, D. J. Enhanced Heat Transfer Surface Development for Exterior Tube Surface [Text] / D. J. Kukulka, R. Smith // *Chemical Engineering Transactions*. – 2013. – vol. 32. – P. 511-516.
5. Спесивцев, В. В. Диагностика силового и теплового воздействия сверхзвуковой струи на преграду [Текст] / В. В. Спесивцев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4(121). – С. 60-64.

6 Пат. 110210 Україна, МПК G01N 25/18. Спосіб визначення теплофізичних параметрів матеріалів та пристрій для його здійснення [Текст] / Спесивцев В. В. ; Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № а201300718 ; заявл. 21.01.2013 ; опуб. 10.12.2015. Бюл. № 23. – 5 с. : ил.

References

1. Lybimova, D. A., Divin, A. G. Ponomarev, S. V. *Izmerenie teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom regul'yarnogo rezhima tret'ego roda* [Measuring of thermophysical properties of heat-insulation materials by the method of the regular mode of the third kind]. Tambov, FGBOU VPO «TGTU» Publ., 2014. 80 p.
2. Lybimova, D., Divin, A. Ponomarev, S. Increasing the Precision of Thermal Properties Measurement by the Periodic Heating Method. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, vol. 39, pp. 1315 – 1320.
3. Ka'zmiarczак-Balata, A., Bodzenta, J. Trefon-Radziejewska, D. Determination of Thermal-Diffusivity Dependence on Temperature of Transparent Samples by Thermal Wave Method. *International Journal of Thermophysics*, 2010, vol. 31, pp. 180-186.
4. Kukulka, D. J., Smith, R. Enhanced Heat Transfer Surface Development for Exterior Tube Surface. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 32, pp. 511-516.
5. Spesivtsev, V. V. Diagnostika silovogo i teplovogo vozdeistviya sverkhzvukovoi strui na pregradu [Diagnostics of power and heat impact of supersonic jet on flat barrier]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, vol. 121, no. 4, pp. 60-64.
6. Spesivtsev, V. V. *Sposib viznachennya teplofizichnikh parametriv materialiv ta pristirii dlya iogo zdiisnennya* [The method of determining the thermophysical parameters of materials and device for its implementation]. Patent UA, no. 110210, 2015.

Поступила в редакцию 2.03.2019, рассмотрена на редколлегии 15.04.2019

ЗБУДЖЕННЯ ГАРМОНІЙНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХВИЛЬ В ТВЕРДОМУ ЗРАЗКУ МАТЕРІАЛУ ПРИ КОНВЕКТИВНОМУ НАГРІВІ

В. В. Спесивцев, Л. Е. Сердюкова

У статті розглядається спосіб і засоби збудження гармонійних температурних хвиль в твердому зразку матеріалу при конвективному нагріві, характерному для умов роботи теплонапружених вузлів і деталей в енергетичних пристроях. В якості теплоносія використаний надзвуковий струмінь продуктів згорання. Розглянута схема живлення і управління режимом роботи газогенератора, що дозволяє надійно регулювати режими його роботи і набувати стабільних значень температури теплоносія. Для визначення температури теплоносія розглянутий метод обліку втрат в камері згорання за допомогою імпульсних коефіцієнтів. Для створення змінної теплової дії використана властивість надзвукової (бочечної) ділянки, що полягає в істотній нерівномірності розподілу газодинамічних параметрів по його довжині. Переміщення зразка відносно струменя необхідно робити зі змінною швидкістю. Для визначення цієї закономірності проведений

аналіз координат ударно-хвильової структури з метою перетворення її лінійних координат у фазові. Використана властивість логарифмічної спіралі. Встановлено, що коефіцієнт зростання логарифмічної спіралі для перших бочок від зрізу сопла трохи змінюється. Приведена схема пристрою для збудження температурної хвилі в зразку. Зразок розташовують на робочому столі, який здійснює зворотно-поступальні рухи відносно струменя (використовується ділянка першої половини другої бочки). Привід робочого столу здійснюється за допомогою кулачка, що обертається з постійною швидкістю. Профіль кулачка виконують по ділянках гілок спіралі (правою і лівою), в цьому випадку тиск струменя газів на робочу поверхню змінюється за гармонійним законом. Коефіцієнт тепловіддачі пропорційний величині тиску. Для визначення теплофізичних характеристик матеріалу в експерименті досить виміряти зрушення фази між коливаннями температури другої поверхні зразка і коливаннями теплового потоку (тиски газу на перешкоді). Точність таких вимірів виявляється вище, ніж при вимірах параметрів при безперервному нагріві зразка.

Ключові слова: надзвуковий струмінь; генератор струменя; ударно-хвильова структура; конвективний нагрів; збудження температурних хвиль в зразку матеріалу.

EXCITATION OF HARMONIC TEMPERATURE WAVES IN A SOLID SAMPLE OF MATERIAL WITH CONVECTIVE HEATING

V. V. Spesivtsev, L. E. Serdiukova

The article discusses the method and means of exciting harmonic temperature waves in a solid sample material during convective heating, it is typical for the working conditions of heat-stressed assemblies and parts in power plants systems. A supersonic jet of combustion products is used as a heat transfer agent. The scheme of power supply feed and control of the mode of operation of the gas generator is considered, which makes it possible to reliably regulate the modes of its operation and to obtain stable values of the heat transfer agent temperature. For determining the temperature of the heat transfer agent, the method of accounting for losses in the combustion chamber with using pulse coefficients is considered. To create a variable thermal effect, the property of the supersonic (barrel) section was used, consisting of the substantial non-uniformity of the distribution of gas-dynamic parameters along its length. The movement of the sample relative to the jet must be carried out at a variable speed. For determining this pattern, we analyzed the coordinates of the shock-wave structure in order to transform its linear coordinates into phase ones. The property of the logarithmic spiral is used. It is established that the growth coefficient of the logarithmic spiral for the first barrels from the nozzle exit varies slightly. The scheme of the device for the excitation of the temperature wave in the sample. The sample is placed on the worktable, which reciprocates relative to the jet (the section of the first half of the second barrel is used). The worktable drive carried out by a cam rotating at a constant speed. The cam profile is carried out along sections of the spiral branches (right and left), in this case, the pressure of the gas jet on the working surface changes according to a harmonic law. The heat transfer coefficient is proportional to the pressure. To determine the thermophysical characteristics of the material in the experiment, it is sufficient to measure the phase shift between the temperature oscillations of the second surface in the sample and the heat flow oscillations (gas pressure on the obstacle). The accuracy of such measurements is higher than when measuring parameters with continuous heating of the sample.

Keywords: supersonic jet; generator of jet; shock-wave structure; convective heating; excitation of temperature waves in a sample of a material.

Спесивцев Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры конструкций и проектирования ракетной техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vspesivtsev@ukr.net.

Сердюкова Людмила Евгеньевна – инженер кафедры конструкций и проектирования ракетной техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vspesivtsev@ukr.net.

Spesivtsev Viktor Vasil'evich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of construction and design rocket technics, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: vspesivtsev@ukr.net.

Serdiukova Ludmila Evgen'evna – engineer of Dept. of construction and design rocket technics, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: vspesivtsev@ukr.net.