

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕРЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

© 2012 А. В. Солодовников, Е. Н. Вышегородцев, В. В. Голубятник

Серпуховской военной институт ракетных войск

Рассматривается методика расчёта параметров прямоточной камеры пульсирующего горения ($V = \text{const}$). Приведён алгоритм расчёта.

Камера пульсирующего горения, математическая модель, расчёт, испытания.

Принципиально новым направлением в двигателестроении является разработка силовых установок, работающих на принципе высокоскоростного сгорания топлива ($V = \text{const}$) и использующих камеру пульсирующего горения (КПГ) с резонансной трубой (РТ), например, пульсирующие воздушно-реактивный [1] и жидкостной ракетный двигатели [2] или турбореактивный двигатель с вибрационной камерой. При этом КПГ потребляет меньше топлива, чем традиционная, при одинаковой их мощности, и в связи с этим фактом ожидаемая эффективность с точки зрения экономии горючего составит 10...30 % [1].

Проведённая авторами статьи научно-исследовательская работа [2, 3] за период с 2006 по 2012 годы в Серпуховском военном институте ракетных войск (СВИ РВ) позволила заключить, что одним из возможных вариантов КПГ (рис. 1) является камера сгорания (КС), оборудованная механическим мембранным клапаном, расположенным перпендикулярно к её оси, и резонансной трубой, которая обеспечивает устойчивый пульсирующий режим горения топливной смеси ($V = \text{const}$). Принцип работы камеры пульсирующего горения следующий. Воздух всасывается через мембрану вследствие возникающего в КС перепада давления в конце фазы выхлопа. При каждом заполнении камеры воздухом в неё подаётся горючее для образования топливной смеси заданного состава. Сжатие рабочего тела осуществляется вследствие сгорания топлива. Расположение впускного клапана перпендикулярно к оси камеры сгорания исключает контакт горячего газа с мембраной и, соответственно, повышается надёжность и ресурс всего агрегата [1].

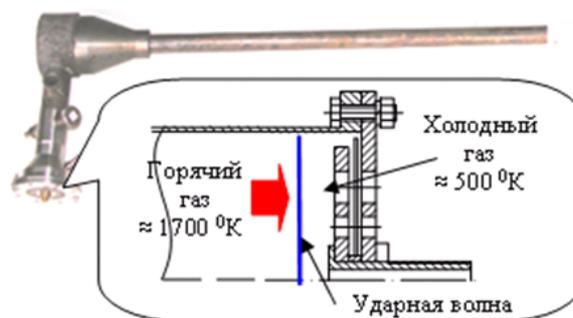


Рис. 1. Модельная КПГ с перпендикулярным расположением механического мембранного клапана

Данный аппарат, реализующий пульсирующий рабочий цикл без предварительного сжатия топливной смеси, отличается предельной конструкторской простотой (так как отсутствуют агрегаты, подающие сжатый воздух в КС) и является наиболее привлекательным для практического использования в технике [3].

В настоящее время разработано несколько различных методов инженерного расчёта КПГ [1], применяемых для проектирования аэрозольных генераторов и пульсирующих воздушно-реактивных двигателей, которые основаны на применении относительных величин для расчёта геометрических размеров агрегатов. Эти данные носят экспериментальный характер и, соответственно, успех в решении задачи определяется научной и технической интуицией конструкторов.

Авторами статьи предлагается усовершенствованный метод, учитывающий применение математического моделирования движения газового потока для расчёта от-

дельных элементов КПП (например, резонансной трубы, форкамер).

Проведённый анализ математических моделей показал, что на данный момент не существует единого подхода к описанию рабочего процесса в КПП. Так, в работе [4] выявлено пять наиболее распространённых подходов к моделированию рабочего процесса, протекающего в камерах пульсирующего горения: акустический, механический, газодинамический, волновой и вихревой.

Указанные методы при моделировании выделяют один физический процесс, имеющий место в рабочем цикле, и применительно к нему осуществляют математическое описание. В действительности все процессы, рассматриваемые в пределах одного из подходов, присутствуют в рабочем цикле КПП. Такая комплексность рабочего процесса камеры пульсирующего горения, с точки зрения протекающих в ней явлений, обуславливается особенностями нестационарного движения газа.

По мнению авторов, для комплексного описания цикла пульсирующей КС необходимо применить метод расчёта, основанный на волновой теории моделирования рабочего процесса. Данный метод основан на составлении и решении систем уравнений, выражающих основные законы сохранения, которые могут быть записаны как в интегральной, так и в дифференциальной формах [4]. Поскольку описание даже одномерного нестационарного движения газа основывается на дифференциальных уравнениях в частных производных гиперболического типа, не имеющих аналитического решения, то эти системы уравнений, как правило, решаются различными численными методами.

Следует отметить, что при решении уравнений газовой динамики эффективно используется метод характеристик, позволяющий понизить уровень задачи до решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и применить более простые численные методы. При этом метод характеристик обладает физической наглядностью и позволяет извлечь максимум информации о волновой природе нестационарного движения сплошной среды. К основным достоинствам данного метода стоит отнести

надёжность получения сходящегося решения.

Модель одномерного неустановившегося движения является одной из наиболее полно изученных газодинамических моделей, так как разработан подробный математический аппарат для исследования систем уравнений с двумя независимыми переменными. Предположение об одномерном характере движения получило широкое распространение по целому ряду причин.

Во-первых, оно приближённо оправдывается для многих случаев реального течения газа (даже если течение в целом не одномерно, то отдельные его части могут быть описаны в рамках одномерного течения).

Во-вторых, многие выявленные в рамках одномерного приближения особенности оказываются качественно присущими и более сложным течениям.

В-третьих, уравнения с двумя независимыми переменными являются сравнительно доступными для качественного анализа и численного расчёта.

В-четвёртых, в теории одномерных течений имеется достаточное количество решённых конкретных задач.

В элементе типа «канал», которым является, в частности, камера пульсирующего горения с резонансной трубой (рис. 2), реализуется одномерное течение газа, уравнение движения которого можно получить из общих интегральных соотношений, представленных в [4] и отражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии.

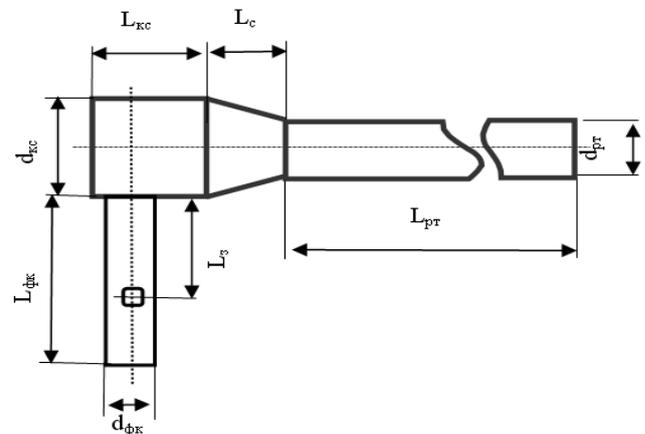


Рис. 2. Расчётная схема КПП

Эти уравнения имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot F) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot F) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u \cdot F) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 \cdot F) &= -\frac{\partial(F \cdot P)}{\partial x} - \tau_0 \cdot l, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[(\rho \cdot F) \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \cdot u \cdot F \cdot \left(e + \frac{u^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right) \right] &= q \cdot l \end{aligned} \right\} (1)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³;
 F – площадь сечения канала, м²;
 u – скорость движения газа, м/с;
 e – удельная внутренняя энергия;
 P – давление, Па;
 τ_0 – среднее по периметру напряжение
силы трения;
 l – периметр сечения канала, м;
 q – количество теплоты, приходящее в
единицу времени через единичную площадь
поверхности, Дж/м²;
 t – время, с;
 x – координата вдоль оси канала, м.

Первое уравнение системы (1) – уравнение неразрывности, отражающее закон сохранения массы; второе – уравнение движения, определяющее закон сохранения количества движения; третье – уравнение энергии, представляющее закон сохранения энергии. Система (1) справедлива при следующих допущениях:

- движение рабочего тела одномерное;
- вектор скорости потока в каждой точке поперечного сечения является нормальным по отношению к плоскости сечения;
- значения параметров газа в каждой точке поперечного сечения одинаковы;
- влиянием массовых сил пренебрегаем;
- стенки канала непроницаемы для рабочего тела;
- работой массовых сил и теплообменом от излучения пренебрегаем.

Замкнутое описание математической модели процессов в рабочем теле (газе) предполагает дополнение системы (1) термическим и калорическим уравнениями состояния, которые имеют различный вид в зависимости от модели рабочего тела (иде-

альный или реальный газы). При этом уравнения (1) справедливы также для парожидкостной среды, рассматриваемой как единое рабочее тело. Они являются основой для построения математических моделей процессов во всех разновидностях элемента типа «канал».

Численное решение уравнений, учитывающих вязкость и теплопроводность, затруднено, а во многих задачах в нём просто нет необходимости. Движение идеального (невязкого) газа описывается более простыми дифференциальными уравнениями Эйлера. Результаты, полученные из решения этих уравнений, имеют практическую значимость на стадии проектирования, когда требуется только знание распределения давления. При этом уравнения Эйлера содержат основные элементы динамики газа и описывают течение невязкого нетеплопроводного газа и имеют различный тип при разных режимах течения.

При изучении одномерных неустановившихся движений газа на основе уравнений Эйлера искомыми функциями являются один компонент скорости u и две термодинамические переменные, например, давление P и плотность ρ , а независимыми переменными – линейная координата x и время t . Конечный вид уравнений Эйлера зависит от типа решаемой задачи и допущений, вводимых при моделировании. При составлении уравнений применительно к неустановившемуся течению в проточной части (канале) КПП необходимо принимать во внимание изменение площади поперечного сечения, а также наличие теплоподвода как при горении топливной смеси в КС, так и при движении газа по резонансной трубе.

В качестве упрощений вводятся следующие допущения:

- не учитывается наличие трения о стенки канала;
- не учитывается наличие дополнительных источников массы.

С учётом вышесказанного, а также допущений для системы (1), уравнения нестационарного одномерного движения невязкого сжимаемого газа в проточной части КПП могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u \frac{\partial F}{\partial x} + u F \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho F \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) &= (k-1) \rho \cdot u \cdot q \cdot \end{aligned} \right\} (2)$$

Уравнения (2) могут быть также получены из общей системы одномерного нестационарного движения реального газа в элементе типа «канал» с учётом оговоренных выше дополнительных допущений, а также с учетом калорического уравнения состояния для идеального газа.

Таким образом, имеем систему из трёх дифференциальных уравнений в частных производных, в которых в качестве независимых переменных выступают координата x и время t , а в качестве зависимых (искомых) переменных – скорость u , давление P и плотность ρ . Данная система полностью описывает нестационарное течение рабочего тела в проточной части КПП, учитывает изменения площади поперечного сечения проточной части, а также теплоподвод к рабочему телу. Решение вышеуказанных уравнений предполагает задание начальных и граничных условий.

Для решения системы уравнений (2) целесообразно использовать метод характеристик, алгоритмическая и программная реализация которого была отработана в Серпуховском военном институте ракетных войск при проектировании различных КПП для ракетных двигателей, энергетических и аэрозольных генераторов.

Методика инженерного расчёта КПП, предложенная авторами статьи, представлена на рис. 3.

Приведённая методика расчёта основных параметров камеры пульсирующего горения использует вычислительный эксперимент, в результате которого выбираются оптимальные геометрические параметры (например - длина РТ, форкамеры).

Представленная математическая модель позволяет определить искомую длину

резонансной трубы (L_{pm}), основываясь на газодинамическом течении пульсирующего газового потока. Предлагаемый способ определения L_{pm} наиболее приемлем для инженерных расчётов, так как моделирование процесса распределения давления в РТ учитывает такие параметры, как массы топлива и воздуха, необходимые для одного цикла работы КПП. Всё это, в свою очередь, повышает точность расчётов.

Известные способы расчёта геометрических параметров в инженерных методиках производятся без учёта вышеперечисленных факторов.

В некоторых задачах, например расчёт КПП для аэрозольного генератора, необходимо определение теплового потока по длине камеры сгорания и резонансной трубы. Поэтому для решения приведённой системы уравнений (2) необходимо знать функцию удельного теплового потока $q = f(x, t)$, подводимого к газу и обусловленного подводом тепла при горении топливной смеси в КПП, а также теплообменом при движении рабочего тела в проточной части. Процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания топливной смеси в КС являются важнейшими и одновременно наименее изученными явлениями. Динамика рабочего процесса в КС определяет работоспособность проектируемого агрегата, экологичность и эффективность использования топлива.

В основу рабочего процесса камеры пульсирующего горения авторами статьи заложена динамика резонансно-волновых процессов. При этом источником энергии для всего рабочего цикла является давление, создаваемое в КПП. Амплитуда и длина волны определяется процессами, протекающими в КС. Так как рабочий процесс КПП имеет циклический характер, то к времени протекания процессов смесеобразования, воспламенения и сгорания предъявляются жёсткие требования, определяемые геометрией проточной части энергоустановок (двигателя).

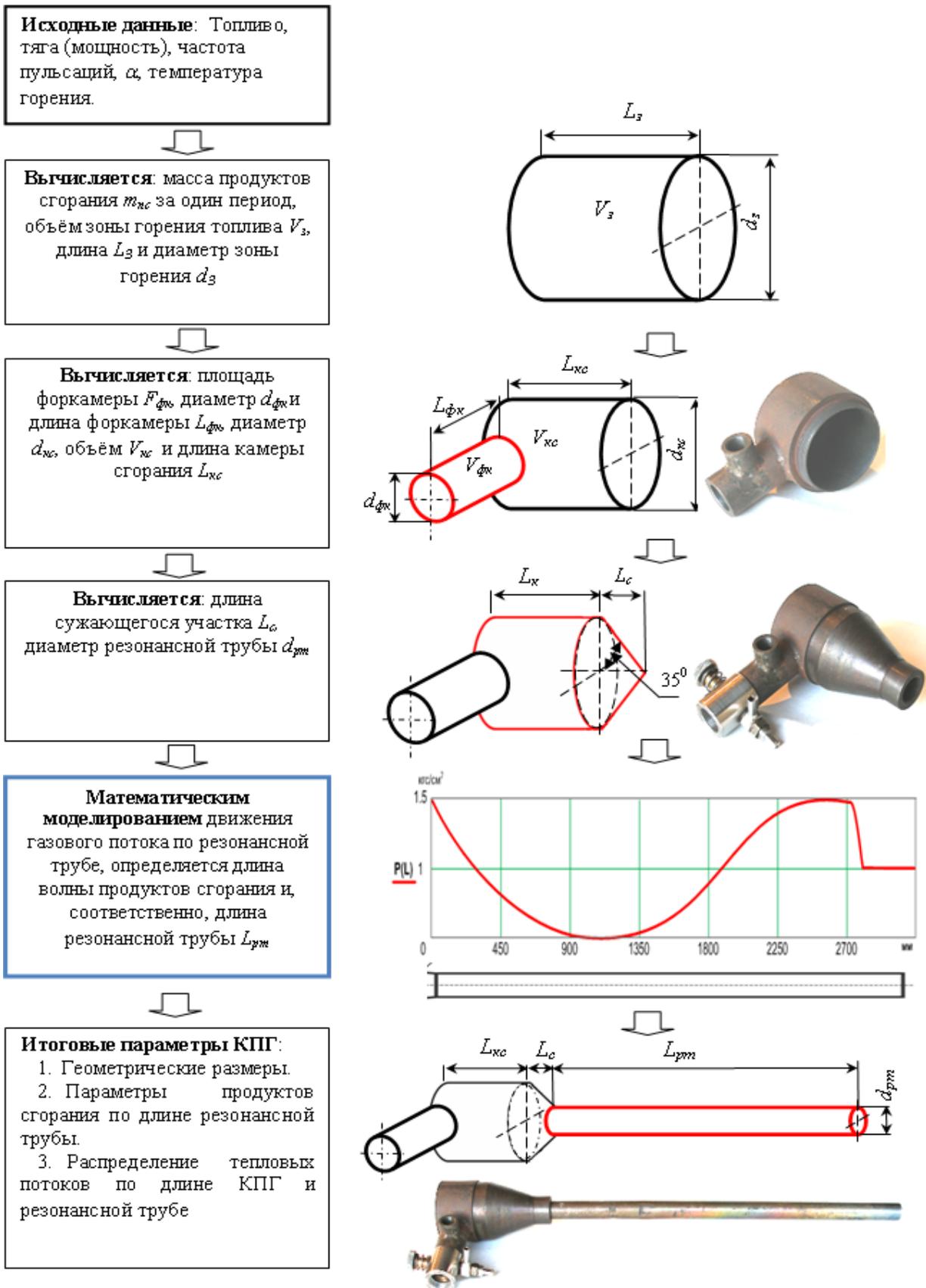


Рис. 3. Методика расчёта камеры пульсирующего горения (пример определения оптимальной длины резонансной трубы)

С теоретической точки зрения динамическая постановка задачи исследования процесса сгорания требует применения математического аппарата кинетики химических реакций и явлений переноса для описания диффузионных процессов.

Таким образом, детальное моделирование динамики выгорания топливной смеси в КПП представляет собой самостоятельную проблему, требующую отдельного научного рассмотрения и описания.

Кроме того, применение сложной модели динамики горения приводит к существенному усложнению математической модели рабочего процесса КПП и делает её «тяжёлой» даже при использовании возможностей современной вычислительной техники. В ряде работ, например [1], рабочий процесс камеры сгорания рассматривается в упрощённой форме.

Для определения удельного теплового потока $q = f(x, t)$, необходимого для решения (2), примем следующие допущения:

- теплоподвод осуществляется только в КС, а по длине РТ не учитывается;
- зона теплоподвода в КС совпадает с зоной камеры и не изменяет своего положения до полного выгорания смеси;
- распределение подводимой теплоты по длине зоны теплоподвода равномерное;
- смесь считается однородной;
- состав смеси определяется по расчётным массам воздуха и горючего, поступившего в камеру при заданном давлении топлива перед форсункой.

Для описания динамики процесса теплоподвода в зоне тепловыделения используются различные модели динамики сгорания смеси. Например, в работе [4] предложено использовать уравнение К. Неймана, которое было получено исходя из представления реакции горения как бимолекулярной реакции между горючим и кислородом воздуха:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{0,21 \cdot K_y \cdot M_0 \cdot G_u}{V_k} (1-y) \cdot \left(\frac{\alpha}{y} - 1 \right) \cdot y, \quad (3)$$

где y – доля прореагировавшего горючего;
 K_y – условная константа скорости реакции;
 V_k – объём КС, м³;

G_u – подача топлива за цикл, кг/с;

M_0 – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг горючего;

α – значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания;

τ – текущее время на интервале одного цикла, с.

Уравнение (3) относится к классу нелинейных дифференциальных обыкновенных уравнений первого порядка, которые, как правило, решаются численными методами. Решение данного уравнения на каждом временном шаге даёт значения доли топлива, прореагировавшего к данному моменту времени.

Далее, используя значение теплотворной способности топлива и задаваясь коэффициентом полноты сгорания, можно определить количество теплоты, подведённой в зоне горения к рабочему телу за текущий интервал времени.

Таким образом, в предположении о равномерном распределении подводимой теплоты по длине зоны теплоподвода выражение для функции удельного теплового потока в камере сгорания на временном интервале цикла имеет вид:

$$q_u(\tau) = \frac{y(\tau) \cdot G_u \cdot Q_T \cdot \eta_T}{S_k \cdot \tau}, \quad (4)$$

где $y(\tau)$ – доля топлива, прореагировавшего к моменту времени τ , получаемая из решения уравнения (3) на каждом временном шаге при численном интегрировании;

G_u – масса топлива, поступившего в КС за один цикл пульсации, кг/с;

Q_T – теплотворная способность компонентов топлива;

η_T – коэффициент полноты сгорания топлива;

S_k – площадь внутренней боковой поверхности камеры сгорания, м².

Следует заметить, что уравнение (3) может быть решено аналитически (в квадратурах). Представим уравнение (3) в виде

$$\frac{dy}{dt} = A \cdot (1-y) \cdot \left(\frac{\alpha}{y} - 1 \right) \cdot y, \quad (5)$$

где $A = \frac{0,21 \cdot K_y \cdot M_0 \cdot G_u}{V_k}$.

Уравнение (5) преобразуем к виду

$$\frac{dy}{d\tau} - A \cdot y^2 + A \cdot (\alpha + 1) \cdot y - A \cdot \alpha = 0 \quad (6)$$

или

$$\frac{dy}{d\tau} + a \cdot y^2 + b \cdot y + c = 0, \quad (7)$$

где $a = -A$;

$$b = A \cdot (\alpha + 1); \quad (8)$$

$$c = -A \cdot \alpha.$$

Уравнение (7) относится к классу уравнений Риккати [4]. Как известно, если коэффициенты a, b, c в уравнении Риккати постоянны, то допускается разделение переменных и общий интеграл уравнения (7) имеет вид:

$$C_1 - \tau = \int \frac{dy}{a \cdot y^2 + b \cdot y + c}. \quad (9)$$

Выражение для интеграла от алгебраической функции в (9) равно [4]

$$\int \frac{dy}{a \cdot y^2 + b \cdot y + c} = \frac{1}{b^2 - 4 \cdot a \cdot c} \times \times \ln \left[\frac{2 \cdot a \cdot y + b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a \cdot y + b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}} \right], \quad (10)$$

если $b^2 - 4ac > 0$,

$$\int \frac{dy}{a \cdot y^2 + b \cdot y + c} = \frac{2}{\sqrt{4 \cdot a \cdot c - b^2}} \times \times \arctg \frac{2 \cdot a \cdot x + b}{\sqrt{4 \cdot a \cdot c - b^2}}, \quad (11)$$

если $b^2 - 4ac < 0$,

$$\int \frac{dy}{a \cdot y^2 + b \cdot y + c} = -\frac{2}{2 \cdot a \cdot x + b}, \quad (12)$$

если $b^2 - 4ac = 0$.

Определим значение $b^2 - 4ac$ с учётом (8):

$$b^2 - 4 \cdot a \cdot c = A^2 \cdot (\alpha + 1)^2 - 4 \cdot A^2 \cdot \alpha = A^2 \cdot (\alpha - 1)^2.$$

Поскольку $\alpha - 1$, то $(b^2 - 4ac) > 0$ и выражение для интеграла (9) имеет вид (10).

Обозначим

$$g = \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c} = A \cdot (\alpha - 1). \quad (13)$$

Тогда решение (9) с учётом (10) запишется:

$$C_1 - \tau = \frac{1}{g} \cdot \ln \frac{2 \cdot a \cdot y + b - g}{2 \cdot a \cdot y + b + g}, \quad (14)$$

откуда

$$\ln \frac{2 \cdot a \cdot y + b - g}{2 \cdot a \cdot y + b + g} = C_1 g - \tau g$$

или

$$y = \frac{g}{a(1 - C_2 \cdot e^{-g\tau})} - \frac{b + g}{2a}. \quad (15)$$

Определим постоянную C_2 из начальных условий решения уравнения (3):

$$\tau = 0, \text{ то } y = 0.$$

Тогда из (15) имеем

$$\frac{g}{a(1 - C_2)} - \frac{b + g}{2a} = 0, \quad (16)$$

откуда

$$C_2 = 1 - \frac{2g}{b + g}, \quad (17)$$

или с учётом (8)

$$C_2 = \frac{1}{\alpha}. \quad (18)$$

Подставив выражения (18) и (8) в (15), получим окончательное решение уравнения (3) в виде

$$y(\tau) = \alpha - \frac{\alpha - 1}{1 - \frac{1}{\alpha} e^{-A(\alpha - 1)\tau}}. \quad (19)$$

Отметим, что при $\tau \rightarrow 0, y \rightarrow 0$, а при $\tau \rightarrow \infty, y \rightarrow 1$, что соответствует физической сущности процесса сгорания топлива и косвенно подтверждает корректность решения (19).

С учётом (19) выражение (4) для удельного теплового потока в КС на временном интервале цикла пульсаций примет вид:

$$q_u(\tau) = B \cdot \frac{1}{\tau} \left(\alpha - \frac{\alpha - 1}{1 - \frac{1}{\alpha} e^{-A(\alpha - 1)\tau}} \right), \quad (20)$$

$$\text{где } B = \frac{G_u Q_T \eta_T}{S_k}. \quad (21)$$

Выражение (20) определяет характер изменения удельного теплового потока на временном интервале цикла пульсаций и повторяется периодически с периодом, равным периоду пульсаций T , т. е. $0 \leq \tau \leq T$. Для интегрирования уравнения (2) необходимо определить характер изменения удельного теплового потока во времени $q(t)$ для всего времени работы КПП, т. е. при $t \geq 0$.

Таким образом, функция $q(t)$ является негармонической периодической функцией времени с периодом T и удовлетворяет условиям Дирихле, т. е. она ограничена, имеет разрывы первого рода с конечным числом экстремумов на конечном интервале. В этом случае изменение $q(t)$ в течение всего времени работы КПП можно представить рядом Фурье

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos n \cdot \omega \cdot t + b_n \cdot \sin n \cdot \omega \cdot t, \quad (22)$$

где $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T q_u(\tau) dt, \quad (23)$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T q_u(\tau) \cdot \cos n \cdot \omega \cdot \tau dt, \quad (24)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T q_u(\tau) \cdot \sin n \cdot \omega \cdot \tau dt, \quad (25)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} - \text{круговая частота пульсаций.}$$

На основе (20), (23-25) получим выражение для коэффициентов Фурье. В форме (22) можно математически описать изменение q в течение всего времени работы КПП.

Однако для интегрирования уравнений (2) необходимо задать изменение удельного теплового потока не только во времени, но и по длине КПП. В предположении, что теплоподвод осуществляется только в КС, выражение удельного теплового потока как функции координаты x и времени t имеет вид:

$$q(x,t) = \sigma \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos n \cdot \omega \cdot t + b_n \cdot \sin n \cdot \omega \cdot t \right),$$

где $\sigma = 1$ при $0 < x \leq L_{КС}$,

$$\sigma = 0 \text{ при } x > L_{КС},$$

$L_{КС}$ – длина камеры сгорания.

Приведённая методика расчёта удельного теплового потока совместно с уравнениями основных параметров КПП использует вычислительный эксперимент, в результате которого получено распределение теплового потока по её длине и резонансной трубе.

В данном примере с помощью математической модели, учитывающей удельный тепловой поток, уточняется длина РТ.

Исходные данные для вычислительного расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчёта

Наименование параметров, размерность	Значение
Мощность, КВт	≈ 12
Горючее	бензин
Расход горючего, кг/с	0,00035
Расход воздуха, кг/с	0,0044
Температура в КПП, К	≈ 1200

Данная математическая модель позволяет определить искомую длину резонансной трубы $L_{рм}$ и распределение удельного теплового потока по ней, основываясь на газодинамическом течении пульсирующего газового потока.

Предлагаемый способ наиболее приемлем для инженерных расчётов, так как моделирование процесса учитывает такие параметры, как масса топлива и воздуха, необходимые для одного цикла работы КПП, и др. Всё это, в свою очередь, повышает точность инженерных расчётов.

Расчётные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчётные параметры распределения температуры по длине камеры сгорания и резонансной трубы

Наименование	Значение			
Расстояние от торца КС, м	0	0,08	0,14	0,8
Температура стенки, °К	980	1173	852	800

Распределение удельного теплового потока по длине РТ показано на рис. 4.

С целью подтверждения вычислительных расчётов авторами была подготовлена экспериментальная модель КПП (рис. 1). На специальном стенде проведено 5 огневых испытаний. Запуск модели осуществлялся при помощи сжатого воздуха, поступающего из ресивера компрессора. Бензин подавался из бака под действием избыточного давления. Модель КПП запускалась без замечаний. На времени ≈ 4 с агрегат выходил на устойчивый пульсирующий режим. Частота пульсации давления в КПП во всех испытаниях составляла ≈ 130 Гц. После осуществления запуска модели КПП и выхода на режим подача сжатого воздуха из компрессора прекращается. Камера работает в автономном режиме.

Система измерения параметров состояла из четырёх датчиков температуры и двух датчиков давления (один измерял параметр в камере сгорания, второй – в РТ). Осреднённые значения теплового потока представлены четырьмя точками (значения температуры снимались с датчиков).

В результате проведённых исследований модели [2] были получены экспериментальные данные распределения теплового потока по длине КПП (на рис. 4 обозначено цифрой 1) при работе на компонентах топлива «воздух + бензин».

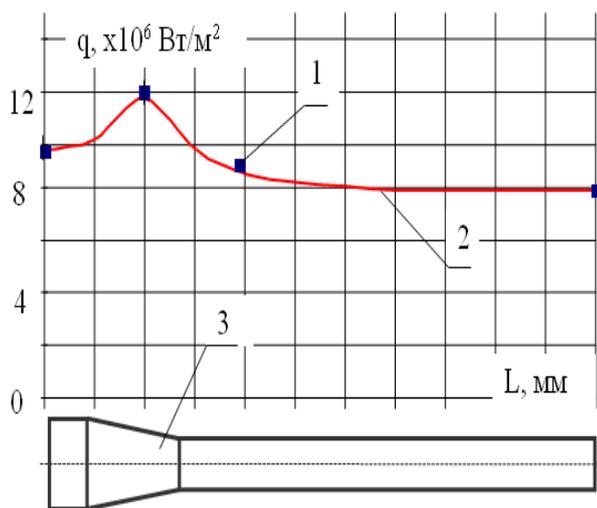


Рис. 4. Распределение теплового потока по длине КПП и резонансной трубы при работе на компонентах топлива воздух + бензин: 1 - экспериментальные данные, 2 - теоретический расчёт, 3 - КПП с резонансной трубой

В результате испытаний были получены:

1. Основные параметры КПП на различных видах горючего.

2. Значения температуры газа в различных точках, что позволило построить распределение теплового потока по длине КПП с резонансной трубой. При этом предложенная методика численного решения задачи позволяет получить удовлетворительные результаты сходимости с экспериментальными данными порядка 10 %.

Таким образом, удаётся рассчитать характеристики такого сложного течения, как движение пульсирующего потока в резонансной трубе, с помощью сравнительно простой методики и получить близкие к опытным данным результаты. Инженерная методика расчёта камеры пульсирующего горения может быть использована при разработке и проектировании новых перспективных пульсирующих воздушно-реактивных двигателей, пульсирующих ЖРД и их совместных комбинаций, аэрозольных генераторов, электрогенераторов, а также других силовых и энергетических установок.

Библиографический список

1. Нечаев, Ю.Н. Пульсирующий детонационный двигатель - это реальность [Текст] / Ю.Н. Нечаев, А.П. Полев, А.Н. Тарасов // Вестн. Воздушного флота. - 2003. - № 4, 2003. - С. 72 - 76.

2. Солодовников, А.В. Аппарат пульсирующего горения – основа комбинированного пульсирующего воздушно – ракетного двигателя [Текст] / А.В. Солодовников, Е.Н. Вышегородцев, В.В. Голубятник. - М.: ЦВНИ МО РФ, 2009.

3. Солодовников, А.В. Исследование пульсирующих камер сгорания и их применение в аэрокосмической технике [Текст] / А.В. Солодовников, Е.Н. Вышегородцев, В.В. Голубятник // Вестн. СГАУ. - 2009. - № 3(19). - Ч. 2. - С. 335 - 344.

4. Быченко, В.И. Теплотехника рабочего процесса в аппаратах пульсирующего горения [Текст] / дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04.: защищена 05.08.03 г., утверждена 10.09.04 г. / Быченко Вячеслав Иванович. - Воронеж, 2004. - 350 с. – Библ.: с 283 - 302.

CALCULATION METHODOLOGY OF INTERMITTENT BURNING CHAMBER MAIN PARAMETERS

© 2012 A. V. Solodovnikov, E. N. Vishegorodcev, V. V. Golubyatnik

Serpukhov Military Institution of Missile Forces

Calculation methodology of direct-flow intermittent burning chamber main parameters ($V = \text{const}$) is treated in this paper. The calculation algorithm is given.

Intermittent burning chamber, mathematical model, calculation, testing.

Информация об авторах

Солодовников Алексей Витальевич, преподаватель кафедры Серпуховского военного института ракетных войск, подполковник. E-mail: aleksey.solod@mail.ru. Область научных интересов: термодинамика и тепловые машины.

Вышегородцев Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры Серпуховского военного института ракетных войск, полковник. Область научных интересов: аэродинамика, газовая динамика, конструкция ракетных двигателей.

Голубятник Вячеслав Васильевич, кандидат технических наук, научный консультант Серпуховского военного института ракетных войск. E-mail: slava 6123@rambler.ru. Область научных интересов: термодинамика и газовая динамика, конструкция ракетных двигателей.

Solodovnikov Aleksey Vitalievich, the chair teacher of Serpukhov military institution of missile forces, lieutenant-colonel. E-mail: aleksey.solod@mail.ru. Area of research: thermodynamics and heat engines.

Vishegorodcev Evgeny Nikolayevich, the candidate of engineering sciences, senior lecturer, chair chief of Serpukhov military institution of missile forces, colonel. Area of research: engineer-aerodynamics, gas dynamics, rocket engines.

Golubyatnik Vyacheslav Vasilyevich, candidate of engineering sciences, Serpukhov military institution of missile forces. E-mail: slava 6123@rambler. ru. Area of research: thermodynamics and gas dynamics, design of rocket engines.