

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

© 2022

- А. В. Солодовников** кандидат технических наук, доцент, полковник, начальник кафедры; Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов; aleksey.solod@mail.ru
- Д. А. Оденцов** преподаватель кафедры; Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов. skaut_1979@mail.ru
- Е. В. Кравцов** подполковник, преподаватель; Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов; varvsn-serp@mil.ru
- В. В. Голубятник** кандидат технических наук, заместитель начальника отдела; Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов. slava6123@rambler.ru
- Д. А. Щерблыкин** аспирант; Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; daniilsh.vrn@gmail.com

Приведена модель расчёта пульсаций давления в зависимости от времени, в предположении, что горение топлива проходит по изохорическому циклу, а истечение газа через резонансную трубу – по изотермическому процессу. Описаны условия применения математической модели и её особенности. Показана динамика изменения давления в процессе работы камеры пульсирующего горения с различными геометрическими параметрами. Разработана программа, реализующая полученную зависимость, для расчёта и сравнения полученных теоретических данных с исследованиями других авторов.

Камера сгорания; пульсации давления; математическая модель расчёта давления

Цитирование: Солодовников А.В., Оденцов Д.А., Кравцов Е.В., Голубятник В.В., Щерблыкин Д.А. Математическая модель расчёта давления в камере пульсирующего горения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 1. С. 81-90. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-81-90

Анализ современного состояния науки и техники в области применения камер пульсирующего горения (КПГ) показывает, что существующие теоретические положения и математические модели слабо отражают реальную картину их внутрикамерных процессов.

КПГ работает по термодинамическому циклу, объём $V = \text{const}$. Особенностью её функционирования является цикличное горение топлива. Конструктивно она состоит из камеры сгорания (КС) с впускными клапанами воздуха и горючего, а также резонансной трубы (РТ). В процессе горения топлива в КС создаётся повышенное давление, которое закрывает клапаны подачи. При этом продукты сгорания перетекают в резонансную трубу. Двигаясь по инерции в проточной части РТ, газ создает перепад давления между камерой и внешней средой, что приводит к открытию впускных клапанов и поступлению новой порции горючего с воздухом, которые воспламеняются. Цикл повторяется и горение продолжается в автотельном режиме.

Цель работы состоит в разработке математической модели, описывающей динамику протекающих внутрикамерных процессов в КППГ.

Расчётная схема камеры пульсирующего горения приведена на рис. 1 и состоит из двух элементов: КС и РТ. В данной модели КППГ рассматривается как контрольный объём, который определяется втеканием в него горючей смеси G_{np} , кг/с и истечением продуктов сгорания G_{pm} , кг/с через резонансную трубу.

Введём допущения, которые позволяют решить задачу аналитически:

1. Считаем что газ, протекающий через КС и РТ, идеальный.
2. Газовая постоянная $R = \text{const}$ и слабо зависит от плотности и температуры, но является различной величиной в зависимости от природы газа [1].
3. Горение топлива происходит мгновенно за пределами КС, догорание в проточной части КППГ отсутствует и в камеру втекает однородный газ.
4. Внешняя механическая работа не совершается.
5. Трением газа о стенки КППГ можно пренебречь.
6. Рассматривается изотермический цикл течения газа из КС через РТ. Согласно [1] процесс при $T = \text{const}$ позволяет разработать линейную математическую модель. В других случаях, например при адиабатном процессе течения газа, модель становится нелинейной и имеет сложное решение.
7. Применяется одномерная модель неустойчивого движения, которая является наиболее полно изученной среди газодинамических моделей.

Для исследования зависимости параметров в КППГ необходимо составить дифференциальные уравнения, которые описывают движение газового потока в КС и РТ.

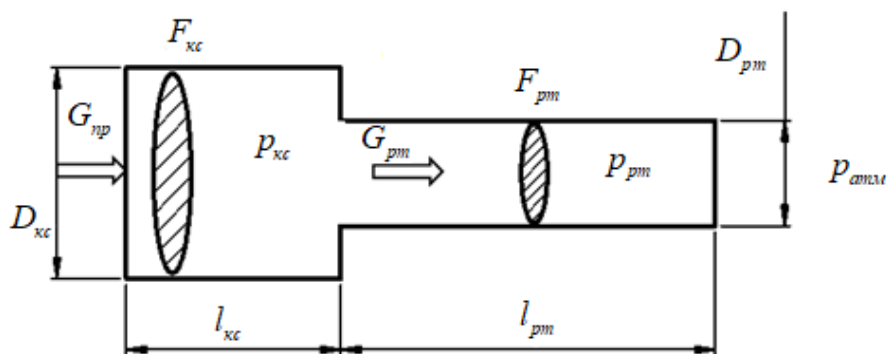


Рис. 1. Расчётная схема камеры пульсирующего горения

Рассмотрим движение газа в контрольном объёме: камера сгорания – резонансная труба (рис. 1). Считаем, что КС закрыта с одной стороны. Если геометрические параметры КППГ описывать при помощи площади сечения F , м^2 и объёма V , м^3 , то математические выражения, которые в совокупности описывают динамическое состояние камеры пульсирующего горения, можно записать в следующем виде:

1. Уравнение состояния газа:

$$pV = mRT, \tag{1}$$

где p – давление в камере сгорания, Па; V – объём КС, м^3 ; m – масса газа, кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура газа в КС, К.

2. Уравнение массового баланса:

$$\frac{dm_{\text{кc}}}{dt} = G_{\text{нр}} - G_{\text{рм}}, \quad (2)$$

где $\frac{dm_{\text{кc}}}{dt}$ – изменение массы в контрольном объёме относительно времени; $G_{\text{нр}}$ – приход продуктов сгорания в КС, кг/с; $G_{\text{рм}}$ – расход газа через резонансную трубу, кг/с.

3. Формула скорости горения топлива [2]:

$$w_{\text{кc}} = A e^{-\frac{E}{R_0 T}}, \quad (3)$$

где E – энергия активации (для бензина $E \approx 10...30$, кДж/моль) [3]; R_0 – универсальная газовая постоянная, $R_0 \approx 8,314$, Дж/(моль·К); A – предэкспоненциальный множитель, $A \approx 10$, м/с; T – температура горения в КС, К.

Продифференцируем уравнение состояния (1) по времени с учётом $V = \text{const}$ и $R = \text{const}$:

$$V \frac{dp}{dt} = RT \left(\frac{dm}{dt} + \frac{m}{T} \cdot \frac{dT}{dt} \right). \quad (4)$$

Согласно допущению $T = \text{const}$, следовательно $\frac{dT}{dt} = 0$, и выражение (4) примет следующий вид:

$$V \frac{dp_{\text{кc}}}{dt} = RT \frac{dm_{\text{кc}}}{dt}. \quad (5)$$

В приведённом выражении динамика газового потока описывается уравнением баланса массы (2), которую подставим в (5) и после преобразования получим:

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{dp_{\text{кc}}}{dt} = G_{\text{нр}} - G_{\text{рм}}. \quad (6)$$

Продифференцируем уравнение (6) по времени с учётом $V = \text{const}$, $R = \text{const}$ и $T = \text{const}$:

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{d^2 p_{\text{кc}}}{dt^2} = \frac{dG_{\text{нр}}}{dt} - \frac{dG_{\text{рм}}}{dt}. \quad (7)$$

Рассмотрим величины, входящие в правую часть выражения (7), отдельно. Первый член $\frac{dG_{\text{нр}}}{dt}$ правой части уравнения описывает изменение расхода газа по времени в КС. В условиях устойчивого автоколебательного режима работы параметры продуктов сгорания в камере зависят, в первую очередь, от подачи горючего и окислителя.

В схеме, предложенной на рис. 1, бензин и воздух поступают периодически в виде однородной сгоревшей газовой смеси.

Согласно [4] и с учётом постановки задачи (периодическое горение топлива), воспользуемся синусоидальным законом изменения прихода газа:

$$G_{np} = G_{kc} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где ω – угловая частота колебаний, c^{-1} ; G_{kc} – расход компонентов топлива, кг/с; t – время, с; φ_0 – начальная фаза, рад.

Угловая частота колебаний определяется по формуле

$$\omega = 2\pi f_0,$$

где f_0 – частота колебаний, c^{-1} (в КППГ f_0 находится в диапазоне 30 ... 400 Гц).

Учитывая время запаздывания между давлением в КС и расходом топлива G_{np} , при низкочастотных колебаниях согласно [5] $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, получим:

$$G_{np} = G_{kc} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Таким образом, приход компонентов в КС изменяется согласно косинусоидальному закону [6]:

$$G_{np} = G_{kc} \cos(\omega t). \quad (8)$$

Расход газа G_{kc} в КС определим из выражения [7]

$$G_{kc} = \frac{\bar{V}_{kc}}{RT} p_{kc},$$

где \bar{V}_{kc} – объёмный расход газа, m^3/c , равный

$$\bar{V}_{kc} = F_{kc} w_{kc},$$

где F_{kc} – площадь проходного сечения КС, m^2 ; w_{kc} – скорость газа в КС, м/с.

Так как температуру газа считаем величиной постоянной, то скорость газа в КС выразим формулой (3) согласно [7].

Далее дифференцируем по времени уравнение (8), принимая, что $F_{kc} = \text{const}$ и $w_{kc} = \text{const}$:

$$\frac{dG_{np}}{dt} = \frac{F_{kc} w_{kc}}{RT} \cdot \frac{d}{dt} [p_{kc} \cos(\omega t)] = \frac{F_{kc} w_{kc}}{RT} \cos(\omega t) \frac{dp_{kc}}{dt} - \frac{F_{kc} w_{kc}}{RT} p_{kc} \omega \sin(\omega t). \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает динамический процесс в КС.

Второй член $\frac{dG_{pm}}{dt}$ правой части формулы (7) описывает изменение расхода газа по времени через РТ. При этом резонансная труба своими геометрическими размерами определяет частоту и интенсивность колебаний газа.

Согласно [1] для идеального газа, движущегося с изменяющейся во времени $t(c)$ скоростью w_{pm} (м/с), можно пренебречь изменением его плотности ρ (кг/м³) по длине l_{pm} (м) участка резонансной трубы с поперечным сечением площадью F_{pm} (м²). Необходимо отметить, что учёт изменения плотности по длине РТ приведёт к более сложной зависимости изменения расхода газа.

В соответствии со вторым законом Ньютона [1] имеем:

$$F_{pm} \Delta p = \rho F_{pm} l_{pm} \frac{dw_{pm}}{dt},$$

где Δp – разность давлений в начале и конце РТ, Па.

Учитывая, что $G_{pm} = \rho F_{pm} w_{pm}$, последнее уравнение примет вид:

$$\Delta p = \frac{l_{pm}}{F_{pm}} \cdot \frac{dG_{pm}}{dt}. \quad (10)$$

Согласно рис. 1 изменение давления в резонансной трубе равно

$$\Delta p = p_{kc} - p_{вых}, \quad (11)$$

где $p_{вых}$ – давление на выходе из РТ, Па.

Подставив (11) в выражение (10), получим:

$$\frac{dG_{pm}}{dt} = \frac{F_{pm}}{l_{pm}} (p_{kc} - p_{вых}). \quad (12)$$

Формула (12) описывает динамический процесс течения газа в РТ КПП.

Уравнения (12) и (9) подставим в выражение (7), предполагая, что $p_{вых} = p_{атм}$ ($p_{атм} = 98066$ Па атмосферное давление):

$$\frac{V}{RT} \cdot \frac{d^2 p_{kc}}{dt^2} = \frac{F_{kc} w_{kc}}{R \cdot T} \cos(\omega t) \frac{dp_{kc}}{dt} - \frac{F_{kc} w_{kc}}{RT} p_{kc} \omega \sin(\omega t) - \frac{F_{pm}}{l_{pm}} (p_{kc} - p_{атм}).$$

Преобразовав последнее выражение и вводя обозначение $p_{kc} = p$, получим

$$V \frac{d^2 p}{dt^2} = F_{kc} w_{kc} \cos(\omega t) \frac{dp}{dt} - p \left[\frac{F_{pm}}{l_{pm}} RT + F_{kc} w_{kc} \omega \sin(\omega t) \right] + \frac{F_{pm}}{l_{pm}} RT p_{атм}. \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает изменение давления в КПП в зависимости от времени. Программа, реализующая приведённый алгоритм, разработана в соответствии с методикой, изложенной в [8]. С этой целью введены новые обозначения в уравнение (13):

$$p = x, \frac{dp}{dt} = v_x, \frac{d^2 p}{dt^2} = a_x, V = m, \frac{F_{pm}}{l_{pm}} RT = k,$$

$$F_{kc} w_{kc} \omega = k1, F_{kc} w_{kc} = r, \frac{F_{pm}}{l_{pm}} RT p_{амм} = F.$$

Параметры m , k , $k1$, r и F являются постоянными значениями для конкретной конструкции КПП и вида топлива. Таким образом, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$m a_x = F + r \cos(\omega t) v_x - [k + k1 \sin(\omega t)] x, \quad (14)$$

$$F^t = F;$$

$$a_x^{t+1} = \{F^t + r \cos(\omega t) v_x^t - [k + k1 \sin(\omega t)] x^t\} / m;$$

$$v_x^{t+1} = v_x^t + a_x^{t+1} \Delta t;$$

$$x_x^{t+1} = x^t + v_x^{t+1} \Delta t.$$

Согласно [7] расчётное звуковое давление p в газовой среде налагается на существующее атмосферное давление $p_{амм}$ и данный факт необходимо учитывать в вычислительной программе.

Программа, реализующая вышеприведённое математическое выражение (14), написана в виде макроса на языке VBA (Бейсик) для Excel и приведена на рис. 2. Исходные данные для проверочного расчёта следующие: $T = 800$ К; $R = 292$ Дж/(моль·К); $l_{kc} = 0,09$ м; $D_{kc} = 0,064$ м; $\omega = 1507$ с⁻¹; $l_{pm} = 0,9$ м; $D_{pm} = 0,02$ м; $w_{kc} = 2,7$ м/с.

```

raschet_davlenia_pri_T_const.xlsm - UserForm1 (Code)
CommandButton1
Private Sub CommandButton1_Click()
dt = 0.0001: m = 0.00021: k = 157: r = 0.00257: F = 15700000: k1 = 3.48: w = 1507: x = 0.01
While t < 0.1
t = t + dt
i = i + 1
a = (F + r * Cos(w * t) * v - (k + k1 * Sin(w * t)) * x) / m
v = v + a * dt
x = x + v * dt
If i Mod 10 = 0 Then
Cells(i / 10, 1) = t
Cells(i / 10, 2) = a
Cells(i / 10, 3) = v
Cells(i / 10, 4) = x + 98066
Cells(i / 10, 5) = F
End If
Wend
End Sub
    
```

Рис. 2. Листинг программы для зависимости $p = f(t)$

Коэффициенты уравнения (14) имеют значения: $m = 0,00021$; $r = 0,00257$; $k = 157$; $k1 = 3,8$; $F = 15,7 \cdot 10^6$. В качестве горючего рассматриваем бензин АИ-95, параметры которого приведены в исследовании [3].

На рис. 2 приведён пример расчёта с помощью описанной программы, зависимости давления от времени $p = f(t)$ и результаты показаны на рис. 3, где $p_{атм}$ – является начальной точкой отсчёта, обозначающая атмосферную линию, значение которой равно 98066 Па.

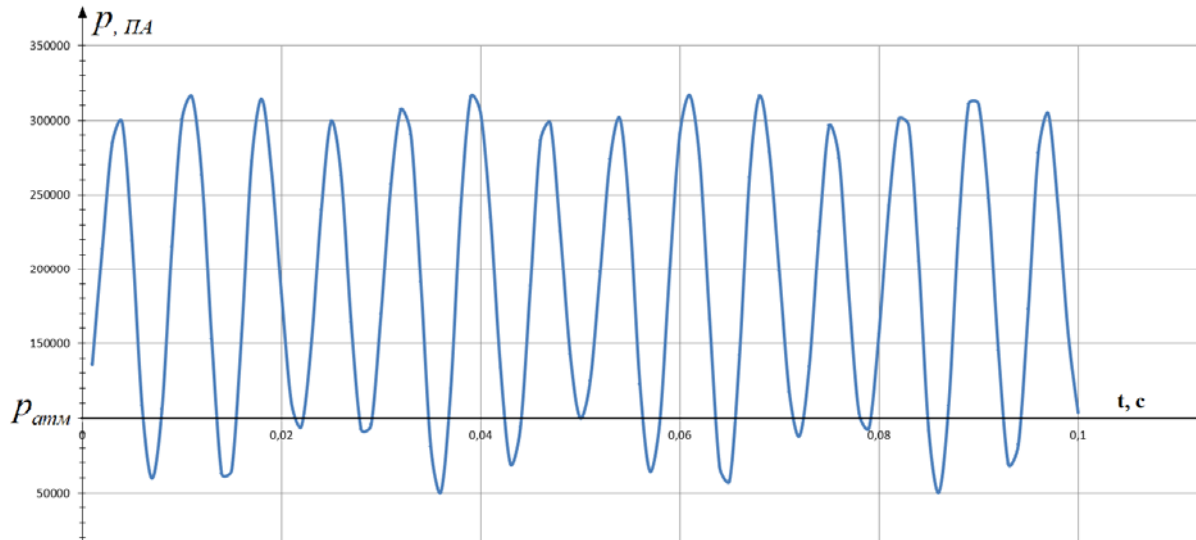


Рис. 3. Результаты расчёта изменения давления в КПП от времени t

Анализируя результат (рис. 3) можно отметить, что изменение p в КПП имеет автоколебательный процесс с разной амплитудой, что связано с погрешностями при вычислении и физическими упрощениями газодинамических процессов. Полученное выражение (13) удовлетворительно описывает максимальную величину давления в КПП $p_{max} \approx (3,0...3,1) \cdot 10^5$ Па и соответствует значению, полученному в [10]. Расчётные значения давления ниже атмосферного показывают возникающее «разрежение» в КС, что согласно [9] создаёт автомодельный колебательный процесс.

Величина частоты пульсации давления, определяемая по рис. 3 ($f \approx 140$ Гц), достаточно точно соответствует расчётному значению, полученному по известной формуле, заимствованной из [10]:

$$f = \frac{a_{pm}}{4l_{pm}}, \quad (15)$$

где a_{pm} – скорость звука в РТ.

Расчёт по выражению (15) при $a_{pm} = 530$ м/с; $l_{pm} = 0,9$ м даёт величину $f \approx 147$ Гц. Погрешность между величиной, рассчитанной по формуле (15) и определённой по графику на рис. 3, составляет около 5%. Результаты расчёта по формуле (13) позволяют определять другие внутрикамерные параметры КПП в зависимости от времени.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Течение горячего газа в камере пульсирующего горения моделируется уравнением квазистационарного течения и является функцией перепада давления от времени процесса. Модель не принимает во внимание потери, связанные с трением газа и теплопередачей в окружающую среду. Полученное дифференциальное уравнение (13) с удовлетворительной точностью описывает установившиеся автоколебательные движения газа в КПП.

2. Выражение (13) даёт возможность проследить внутрикамерную динамику в процессе работы камеры пульсирующего горения с различными геометрическими параметрами.

3. Формула (13) применима для трёхмерного моделирования с помощью программного комплекса ANSYS Fluent и визуализации внутрикамерных процессов газового потока в КПП, так как значения, полученные при расчётах по ней, могут быть использованы как граничные условия на входе в геометрическую модель [11] в соответствии с рис. 4.

При этом необходимо отметить, что трёхмерное моделирование в КПП является отдельной задачей и будет рассматриваться в дальнейшем.

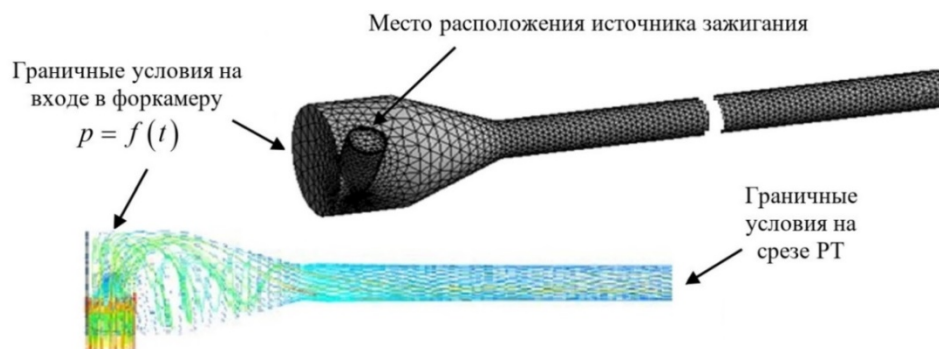


Рис. 4. Пример моделирования скорости газа в ANSYS Fluent при граничных условиях на входе $p = f(t)$

Библиографический список

1. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 496 с.
2. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 1999. 228 с.
3. Сергеев С.М., Петрухин Н.В., Масюков М.В. Экспериментальное исследование горения углеводородных горючих в воздухе // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 2. С. 179-183. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-179-183
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учеб. пособие. СПб: Издательство «Лань», 2010. 608 с.
5. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 398 с.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.

7. Шаулов Ю.Х., Лернер М.О. Горение в жидкостных ракетных двигателях. М.: Оборонгиз, 1961. 196 с.

8. Майер Р.В. Решение физических задач в электронных таблицах Excel: учеб. пособие. Глазов: ГГПИ, 2016. 150 с.

9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.

10. Северянин В.С. Пульсирующее горение, способ интенсификации теплотехнических процессов. Дис. ... доктора техн. наук. Брест, 1986. 435 с.

11. Шаблий Л.С., Кривцов А.В., Колмакова Д.А. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 108 с.

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING PRESSURE IN A PULSATING COMBUSTION CHAMBER

© 2022

A. V. Solodovnikov Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Colonel,
Head of Department;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after
Peter the Great, Serpukhov, Russian Federation;
aleksey.solod@mail.ru

D. A. Odentsov Faculty Instructor;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after
Peter the Great, Serpukhov, Russian Federation;
skaut_1979@mail.ru

E. V. Kravtsov Lieutenant Colonel, Faculty Instructor;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after
Peter the Great, Serpukhov, Russian Federation;
varvsn-serp@mil.ru

V. V. Golubyatnik Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Department;
Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after
Peter the Great, Serpukhov, Russian Federation;
slava.6123@rambler.ru

D. A. Shcheblykin Postgraduate Student;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
daniilsh.vrn@gmail.com

Due to insufficient knowledge of the processes occurring in the chambers of pulsating combustion, as well as lack of mathematical dependencies that make it possible to fully describe the parameters of such chambers, the authors of this article present a model for calculating pressure fluctuations as a function of time. The resulting dependence is based on the fact that the combustion of fuel takes place according to an isochoric cycle, whereas the outflow of gas through a resonant tube is an isothermal process. The conditions for applying the mathematical model and its features are described. With the help of the above dependence, it is possible to trace the dynamics of pressure changes during the operation of a pulsating combustion chamber with different geometric parameters. A program is presented that implements the obtained dependence for calculating and comparing the obtained theoretical data with the studies of other authors.

Combustion chamber; pressure pulsations; mathematical model for calculating pressure

Citation: Solodovnikov A.V., Odentsov D.A., Kravtsov E.V., Golubyatnik V.V., Shcheblykin D.A. Mathematical model for calculating pressure in a pulsating combustion chamber. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 1. P. 81-90. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-81-90

References

1. Zarubin V.S. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical modeling in engineering]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2003. 496 p.
2. Belyaev E.N., Chvanov V.K., Chervakov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Mathematical modeling of the liquid-propellant rocket engine cycle]. Moscow: MAI Publ., 1999. 228 p.
3. Sergeev S.M., Petrukhin N.V., Masyukov M.V. Experimental study of hydrocarbon fuel combustion in the air. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 2. P. 179-183. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-179-183
4. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov: ucheb. posobie* [Handbook on mathematics for engineers and engineering students]. SPb: Lan' Publ., 2010. 608 p.
5. Dobrovolskiy M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid-propellant rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. 398 p.
6. Kuchling H. *Physik*. Leipzig, 1980.
7. Shaulov Yu.Kh., Lerner M.O. *Gorenie v zhidkostnykh raketnykh dvigatelyakh* [Combustion in liquid-propellant rocket engines]. Moscow: Oborongiz Publ., 1961. 196 p.
8. Mayer R.V. *Reshenie fizicheskikh zadach v elektronnykh tablitsakh Excel* [Solving physical problems in Excel spreadsheet: study guide]. Glazov: Glazov State Pedagogical Institute Publ., 2016. 150 p.
9. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 686 p.
10. Severyanin V.S. *Pul'siruyushchee gorenie, sposob intensivatsii teplotekhnicheskikh protsessov. Dis. ... doktora tekhn. nauk* [Pulsating combustion, way of intensifying thermotechnical processes]. Brest, 1986. 435 p.
11. Shabliy L.S., Krivtsov A.V., Kolmakova D.A. *Komp'yuternoe modelirovanie tipovykh gidravlicheskikh i gazodinamicheskikh protsessov dvigateley i energeticheskikh ustanovok v ANSYS Fluent: ucheb. posobie* [Computer modeling of standard hydraulic and gas-dynamic processes in engines and power plants in ANSYS Fluent: study guide]. Samara: Samara University Publ., 2017. 108 p.