УДК: 623.1/7 DOI: 10.53816/23061456_2022_5–6_132

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САМОДЕЙСТВУЮЩЕГО ВПУСКНОГО КЛАПАНА В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

THEORETICAL ASSESSMENT OF THEPROSSIBILITY OF USING A SELF-ACTING INTAKE VALVE IN INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINES

Н.С. Черепанов, д-р техн. наук В.С. Калекин

N.S. Cherepanov, D.Sc. V.S. Kalekin

Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева (г. Омск)

В статье представлено теоретическое обоснование эффективности самодействующего впускного клапана в рамках разработанной физико-математической модели поршневого двигателя внутреннего сгорания с самодействующими впускными клапанами. В модели, основанной на методе динамики частиц, самодействующий впускной клапан представлен в виде эквивалентной механической схемы. Модель дополнена уравнением, описывающим динамику самодействующего впускного клапана. Для моделирования распространения тепла в газовых средах используется уравнение теплопроводности, а универсальная модель горения основана на сеточных конечно-разностных численных методах. На основе модели разработана компьютерная программа для теоретического исследования эффективности самодействующего впускного клапана с различными конструктивными и технологическими параметрами.
Ключевые слова: генераторная установка, двигатель внутреннего сгорания, самодействующий впускной клапан, физико-математическая модель.

The article presents a theoretical justification for the efficiency of a self-acting intake valve within the framework of the developed physical and mathematical model of a piston internal combustion engine with self-acting intake valves. In the particle dynamics model, the self-acting intake valve is represented as an equivalent mechanical circuit. The model is supplemented with an equation describing the dynamics of a self-acting intake valve. To simulate the propagation of heat in gaseous media, the heat conduction equation is used, and the universal combustion model is based on grid finite-difference numerical methods. Based on the model, a computer program has been developed for a theoretical study of the efficiency of a self-acting intake valve with various design and technological parameters.
Keywords: generator set, internal combustion engine, self-acting intake valve, physical and mathematical model.

Современный этап развития танков, а также боевых машин поддержки танков характеризуется необходимостью решения ряда технических проблем, связанных с обеспечением их действий в различных условиях боевой деятельности, в том числе автономных. При этом как никогда решающее значение приобретают вопросы обеспечения постоянной боевой готовности образ-

цов бронетанкового вооружения (БТВ) к боевому использованию в заданное время, а также подвижности и живучести, где немаловажную роль в улучшении основных боевых свойств играют специализированные дизель-генераторные установки (ДГУ) образцов БТВ средних категорий по массе.

Специализированные ДГУ позволяют обеспечивать электрической энергией (ЭЭ) необходимые приемники ЭЭ, без использования основных силовых установок бронеобъектов, значительно увеличивая при этом показатели автономности образцов БТВ в условиях ведения оборонительных действий, а также ряда специальных боевых задач на современных театрах военных действий. Учитывая факт постоянного увеличения приемников ЭЭ в ходе модернизации образцов БТВ [1], где спрос в потребляемой ЭЭ только растет, существует прямое противоречие с техническими возможностями имеющихся на вооружении специализированных ДГУ в рамках энергетических показателей приводного дизельного двигателя.

Дальнейший рост объектовой мощности ДГУ повышением максимальной эффективной мощности дизельного двигателя при лимитированном объеме забронированного корпуса ДГУ становится все более сложной проблемой, которая требует поиска новых конструктивных решений [2, 3].

С этой целью, для решения проблемы увеличения объектовой мощности генераторной установки, в условиях ограниченного забронированного объема отсека ДГУ, было разработано техническое решение четырехтактного дизельного двигателя с самодействующим нормально открытым впускным тарельчатым клапаном 1, (рис. 1), позволяющее получить большую выходную мощность ДГУ, снимаемую с вала приводного дизельного двигателя [4].

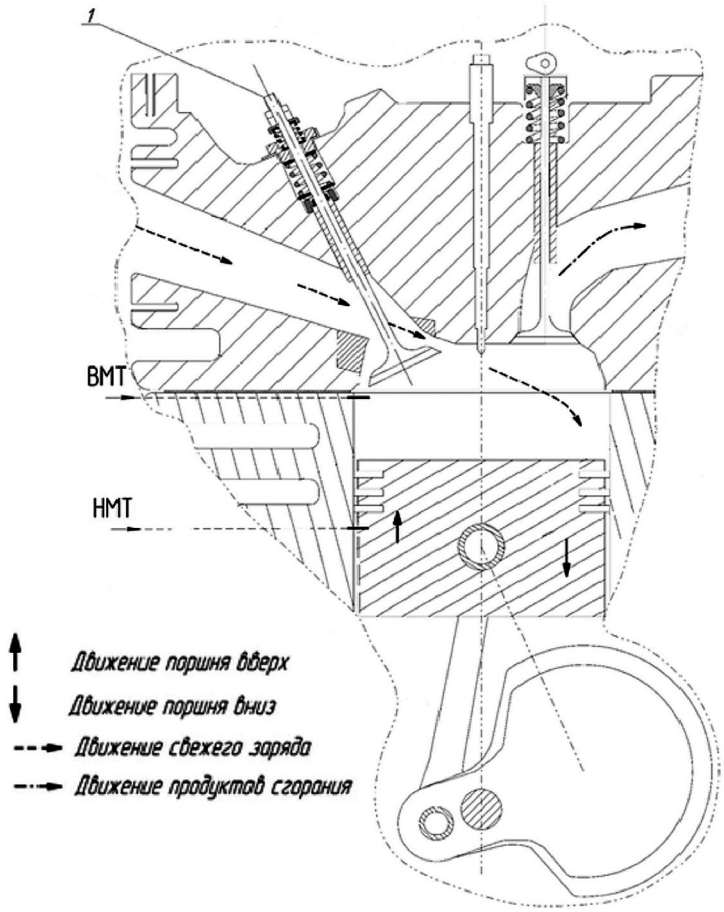


Рис. 1. Схема четырехтактного дизельного двигателя с самодействующим нормально открытым впускным тарельчатым клапаном: 1- самодействующий нормально открытый впускной тарельчатый клапан

При детальной верификации эффективности работы поршневого дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с самодействующими впускными клапанами, авторами проведено теоретическое исследование и разработана компьютерная программа «Программа для теоретического исследования возможности оснащения поршневого ДВС самодействующим впускным клапаном», с помощью которой проведен ряд машинных экспериментов, подтверждающих адекватность разработанной физико-математической модели [5]. В рамках модели предстоит оценить эффективность самодействующего впускного клапана при его различных конструктивных и технологических параметрах, найти его оптимальные параметры.

При разработке физико-математической модели был использован метод динамики частиц, который позволяет с высокой эффективностью оценить с точки зрения аэродинамики движение и изменение состояния газовой среды в поршневом ДВС [6, 7].

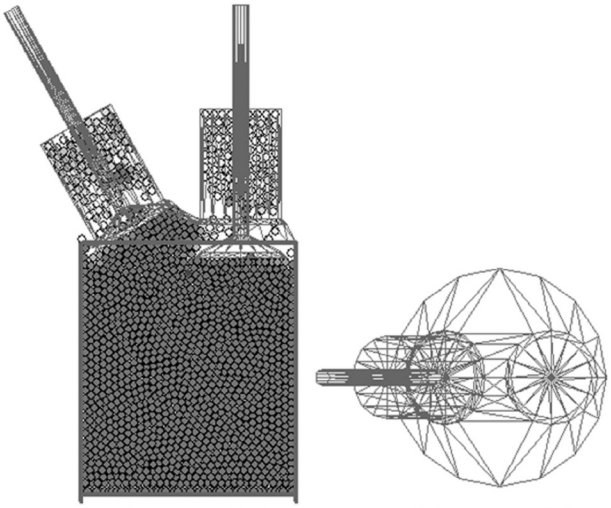
В рамках метода динамики частиц газовая среда разбивается на отдельные элементы шарообразной формы. Элементы обладают физическими свойствами газа, описываются плотностью, давлением, температурой, связанными уравнением состояния идеального газа. Однако, в отличие от приближения сплошной среды, в методе динамики частиц элементы могут двигаться в пространстве, как отдельные друг от друга физические тела, подчиняясь законам классической динамики. При этом элементы могут взаимодействовать между собой и с рабочими поверхностями ДВС (рис. 2).

Такое разбиение среды на отдельные элементы позволяет воспроизводить сложные явления в газовой среде: вихри, турбулентные процессы, смешивание газов, кавитацию, процессы на границе между газом и движущимися поверхностями.

Дифференциальные уравнения второго порядка, лежащие в основе модели, решаются численным методом — методом Рунге-Кутта второго порядка.

$$\xi_i^{\tau+1} = \xi_i^{\tau} + \upsilon_{\xi i}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{\xi i}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2;$$

$$\upsilon_{\xi i}^{\tau+1} = \upsilon_{\xi i}^{\tau} + a_{\xi i}^{\tau} \cdot \Delta t,$$



а (проекция *X-Z*) *б* (проекция *X-Y*)

Рис. 2. Представление поршневого ДВС с самодействующим впускным клапаном: проекции X-Z (а) и X-Y (б)

где $\xi, \upsilon_{\xi}, a_{\xi}$ — обобщенные обозначения соответственно положения (x, y, z), скорости (v_x, v_y, v_z), ускорения (a_x, a_y, a_z) элемента; i — номер элемента, τ и $\tau+1$ — индексы текущего и следующего временного шага; Δt — шаг интегрирования по времени.

Самодействующий впускной клапан представлен в модели абсолютно твердым телом, механически взаимодействующим с элементами газа, двумя пружинами и ограничивающими движение клапана при контакте упорными площадками (рис. 3). Клапан описывается в одномерном приближении: положение клапана задается координатой $x_к$ вдоль оси, совпадающей с геометрической осью клапана.

Движение клапана описывается следующим уравнением:

$$m_к \frac{d^2 x_к}{dt^2} = \\ = \sum_{i=1}^{N_Э} F_{К-Эi}^{x} + \sum_{j=1}^{4} \begin{cases} -c_j \left(L_j - L_{j0} \right) - \\ -\zeta_j \dfrac{dL_j}{dt}, \text{ если } L_j < L_{j0}; \\ 0, \text{ если } L_j \geq L_{j0} \end{cases},$$

где $m_к$ — масса клапана; $F_{К-Эi}^{x}$ — проекция на ось клапана силы взаимодействия клапана с i-м элементом газа; j — номер упругого элемента

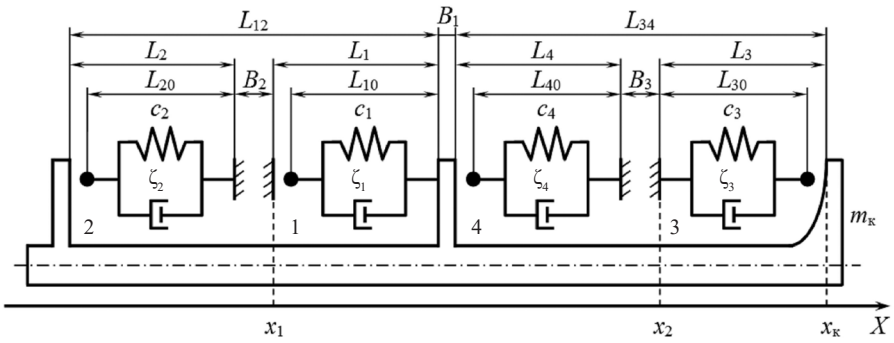


Рис. 3. Представление в модели самодействующего впускного клапана (эквивалентная механическая схема)

(1 — основная пружина, 2 — возвратная пружина, 3 — упругое контактное кольцо, 4 — упругие шайбы с контактной парой тарелка клапана — ответная часть); c_j и ζ_j — коэффициенты жесткости и демпфирования взаимодействия для *j*-го упругого элемента; L_j — текущая длина упругого элемента; L_{j0} — свободная длина упругого элемента (при нулевой нагрузке).

Свободные длины L_j рассчитываются через положение клапана $x_к$ и геометрические параметры клапана следующим образом.

$$L_1 = x_к - L_{34} - B_1 - x_1;$$

$$L_2 = x_1 - B_2 - (x_к - L_{34} - B_1 - L_{12});$$

$$L_3 = x_к - x_2;$$

$$L_4 = x_2 - B_3 - (x_к - L_{34}),$$

где $x_1, x_2, B_1, B_2, B_3, L_{12}, L_{34}$ — геометрические параметры клапана и контактирующих с ним объектов.

Под действием потока элементов газа клапан движется вдоль своей оси (рис. 3), возвращаемый к свободному положению пружинами 1 и 2, и контактируя с упорными элементами 3 и 4 в точках максимального открытия и закрытия.

Для моделирования распространения тепла в газовых средах используется уравнение теплопроводности. Данное уравнение в общем виде можно записать:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\vec{\mathbf{r}},t) = \left(\nabla,\ \chi(\vec{\mathbf{r}},t)\nabla T(\vec{\mathbf{r}},t)\right) + Q(\vec{\mathbf{r}},t), \quad (1)$$

где $T(\vec{\mathbf{r}},t)$ — распределение температуры в пространстве и его изменение с течением времени;

$\vec{\mathbf{r}}$ — радиус-вектор исследуемой точки пространства;

t — время;

$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{\mathbf{i}} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{\mathbf{k}}$ — дифференциальный оператор набла;

x, z — декартовы координаты исследуемой точки пространства;

$\vec{\mathbf{i}}, \vec{\mathbf{k}}$ — единичные векторы в декартовом пространстве;

(,) — скалярное произведение;

$\chi(\vec{\mathbf{r}},t)$ — коэффициент температуропроводности среды (в общем случае зависит от положения в пространстве и времени);

$Q(\vec{\mathbf{r}},t)$ — изменяющееся с течением времени поле источников нагрева и охлаждения. Коэффициент температуропроводности может быть выражен через коэффициенты теплопроводности k, теплоемкости c и плотность вещества ρ следующим образом:

$$\chi = \frac{k}{(c \cdot \rho)}.$$

Из-за чрезвычайной сложности уравнения (1), оно допускает аналитическое решение лишь в простейших, оторванных от реальности случаях (одномерное приближение, строго прямоугольная форма объектов, постоянный коэффициент χ и т.п.). Поэтому для предлагаемой в настоящей работе универсальной модели горения и распространения тепла в ДВС целесообразно использовать сеточные конечно-разностные численные методы [8, 9].

Для решения уравнения используется нерегулярная сетка. Узлами сетки являются текущие центры элементов рассматриваемых сред.

На каждом шаге интегрирования τ определяется повышение (понижение) температуры текущего элемента за счет передачи (отбора) тепла от более (менее) нагретых соседних элементов по формуле, записанной в конечно-разностной форме

$$T_{\Pi i}^{\tau+1} = T_{\Pi i}^{\tau} + \chi_{ij} \frac{T_{\Pi j}^{\tau} - T_{\Pi i}^{\tau}}{r_{ij}} \Delta t,$$

где χ_{ij} — коэффициент передачи температуры от элемента j элементу i.

Для синхронизации одновременно протекающих процессов шаг интегрирования по времени уравнения теплопроводности приравнивается с шагом интегрирования по времени уравнений движения элементов, поэтому процессы механического движения элементов происходят одновременно с процессами распространения тепла и горения.

Разрабатываемая модель должна адекватно воспроизводить воспламенение топливо-воздушной смеси в цилиндре на такте «рабочего хода». Для этого в конце такта «сжатие» определенная часть (доля ξ) элементов газа в цилиндре считается элементами топливо-воздушной смеси, оставшаяся часть (доля $1-\xi$) считается элементами воздуха. Каждый элемент топливо-воздушной смеси в модели обладает заданным запасом c_i химических веществ, которые высвобождаются при нагреве и поддерживают горение. Параметр c_i в ходе горения каждого элемента уменьшается от 1 до 0; элементы с $c_i = 0$ представляют собой «выгоревшие» элементы и не являются далее источниками увеличения температуры.

Скорость горения элемента топливо-воздушной смеси считается пропорциональной температуре и подчиняется уравнению:

$$\frac{dc_i}{dt} = -k_{\Gamma} T_i,$$

где k_{Γ} — коэффициент скорости горения.

Горение элементов топливо-воздушной смеси начинается при повышении его температуры выше критической $T_{\text{К}}$. В конце такта «сжатие» из-за описанных ранее термодинамических процессов повышается температура T_i некоторых элементов. Когда температура T_i какого-либо элемента превысит критическую температуру $T_{\text{К}}$, в модели имитируется интенсивное выделение тепла элементом, что благодаря цепной реакции приводит к имитации воспламенения топливо-воздушной среды в цилиндре. При контакте элементов друг с другом нагрев одного элемента в процессе горения может приводить к нагреву соседних не воспламенённых элементов выше критической температуры, и воспламенение топливо-воздушной среды может распространяться в цилиндре лавинообразно [10, 11].

Начальные и граничные условия. В начальный момент времени модельный поршневой ДВС с самодействующим впускным клапаном равномерно заполнен элементами воздуха, а их начальная температура одинакова и составляет T_0 = 20° С (293 К). Для создания входного потока воздуха элементы появляются по одному во впускном канале через определенный промежуток времени и под действием образующегося давления движутся в тангенциальном направлении вдоль оси канала. Если элемент выходит через вершины основного цилиндра, он выводится из дальнейшего рассмотрения. Для решения тепловой задачи температура рабочих поверхностей поршневого ДВС принимается постоянной и составляет 293 К.

В модели приняты следующие допущения:

– в пределах одного элемента газ считается сплошной средой;

– элементы газа движутся по законам классической динамики, механически взаимодействуя между собой и с поверхностями поршневого ДВС;

– элемент газа является однородным: объемная плотность, температура, давление одинаковы в пределах всего элемента;

– механическое взаимодействие между элементами носит линейный вязкоупругий характер;

– механические свойства элементов газа зависят только от четырех параметров (диаметр, масса, коэффициенты жесткости, вязкости);

– распространение тепла описывается уравнением теплопроводности в общепринятой форме.

По общепринятой классификации моделей предлагаемая модель является не аналитической, а алгоритмической: выходные показатели рассчитываются по входным параметрам по определенному алгоритму (рис. 4).

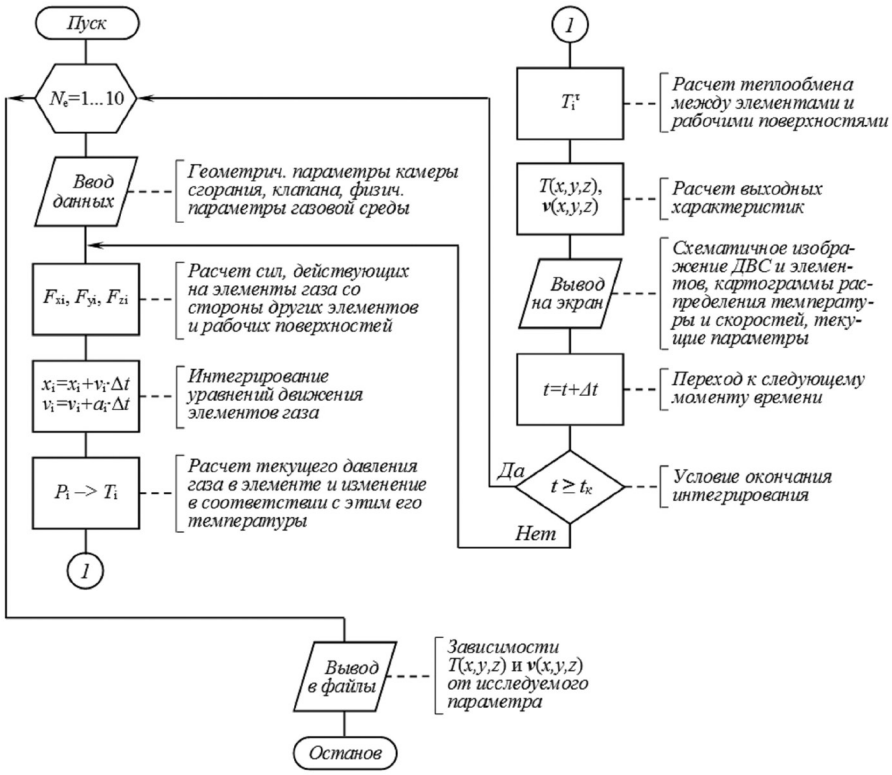


Рис. 4. Схема алгоритма моделирования работы поршневого ДВС с самодействующими впускными клапанами

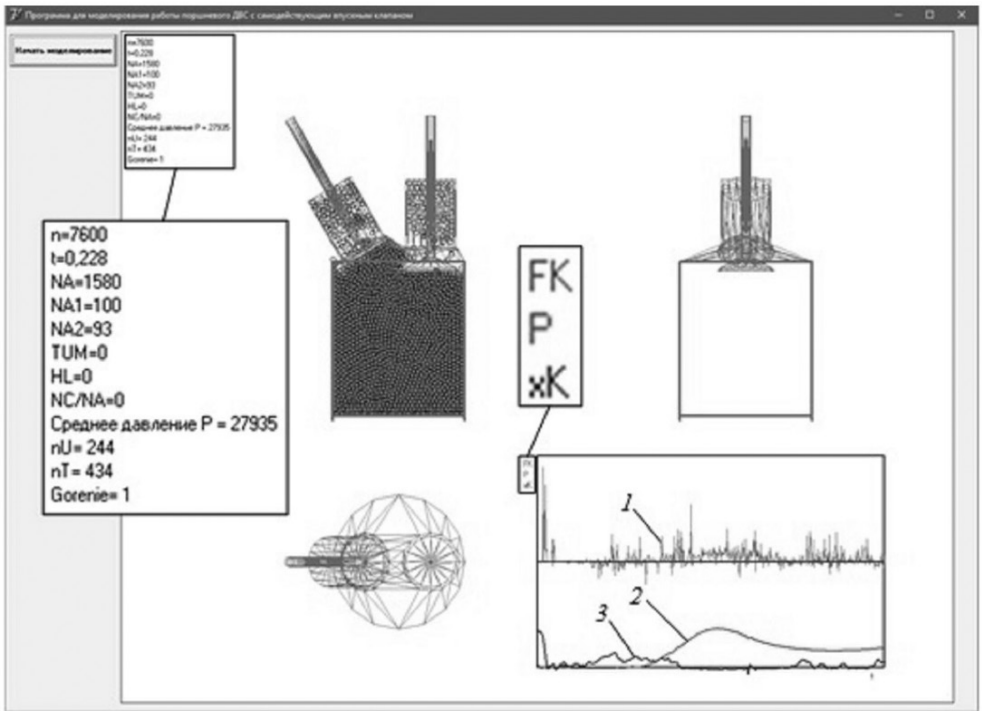


Рис. 5. Программа для моделирования поршневого ДВС с самодействующими впускными клапанами: 1 — ($F_к$) сила, действующая на самодействующий впускной клапан; 2 — (P) давление в цилиндре; 3 — ($x_к$) положение самодействующего впускного клапана

Для исследования предлагаемой модели разработана компьютерная программа «Программа для моделирования поршневого ДВС с самодействующими впускными клапанами». Программа составлена на языке Object Pascal в среде разработки Delphi 7 (рис. 5).

Программа предназначена для моделирования изменения состояния газовой среды в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания при его работе, расчета зависимости от времени давления в области впускного клапана и исследования на этой основе возможности оснащения двигателя самодействующим впускным клапаном. Программа позволяет задать в исходном коде физические параметры газовой среды, геометрические и кинематические параметры ДВС. В процессе работы программа выводит на экран две проекции цилиндра ДВС и газовой среды, график зависимости от времени давления в области впускного клапана. Программа применима для различных типов ДВС и различных режимов их работы. Программа рассчитана на использование компьютера с тактовой частотой процессора не менее 2,6 ГГц, объемом оперативной памяти не менее 4 Гбайт. Объем исходного кода программы составляет 31 кбайт.

Благодаря высокой детализации разработанной модели может быть задано большое количество параметров самодействующего впускного клапана и режимов работы двигателя. Основные входные и выходные переменные модели изображены на рис. 6.

К первой группе входных переменных (факторов) относятся: L_{10}, L_{20}, L_{30}, L_{40} — свободные длины двух пружин и двух эффективных упругих элементов; L_{12}, L_{34} — геометрические параметры самодействующего впускного клапана; c_1, c_2, c_3, c_4 — коэффициенты жесткости двух пружин и двух эффективных упругих элементов; ζ_1, ζ_2, ζ_3, ζ_4 — коэффициенты демпфирования двух пружин и двух эффективных упругих элементов.

Вторая группа входных переменных задает режимы работы двигателя: f — частота вращения вала двигателя; $N_н$ — мощность, потребляемая генераторной установкой (нагрузочная).

Для оценки эффективности разработанного самодействующего впускного клапана в модели рассчитываются следующие показатели: $\mu_В$ — коэффициент расхода воздуха через щель впускного клапана; α — коэффициент избытка воздуха; η_v — коэффициент наполнения цилиндра двигателя; $\varphi_з - \varphi_0$ — разность фаз закрытия и открытия впускного клапана; q — расход топлива двигателем; N — выходная мощность двигателя.

Показатели эффективности рассчитываются по следующим формулам. Коэффициент расхода воздуха через щель впускного клапана рассчитывается по формуле:

$$\mu_В = \sum_{i=1}^{N_э} \begin{cases} 1, & x_i \le x_к; \\ 0, & x_i > x_к, \end{cases}$$

где x_i — координата элемента i газа; $x_к$ — координата точки расположения клапана, относительно которой выполняется подсчет.

Коэффициент избытка воздуха рассчитывается как отношение воздуха, поданного через впускной клапан, к сгоревшему воздуху:

$$a = \frac{\sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \sum_{i=1}^{N_э} \begin{cases} 1, \begin{cases} z_1 \le z_i \le z_2; \\ x_i^2 + y_i^2 \le R_ц^2; \end{cases} \\ 0, \left[\begin{array}{l} z_i > z_2; \\ x_i^2 + y_i^2 > R_ц^2; \end{array} \right. \end{cases}}{\sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \sum_{i=1}^{N_э} \begin{cases} 1, \begin{cases} z_1 \le z_i \le z_2; \\ x_i^2 + y_i^2 \le R_ц^2; \\ c_i = 0; \end{cases} \\ 0, \left[\begin{array}{l} z_i > z_2; \\ x_i^2 + y_i^2 > R_ц^2; \\ c_i \ge 0, \end{array} \right. \end{cases}}$$

где τ_1 и τ_2 — номер шагов интегрирования по времени, для начала тактов впуска и выпуска; z_1 и z_2 — уровни высоты в цилиндре двигателя, между которыми могут располагаться элементы газа; x_i, y_i, z_i, c_i — декартовы координаты и концентрация горючих веществ в элементе i.

Разность фаз закрытия и открытия впускного клапана рассчитывается по формуле:

$$\varphi_3 - \varphi_0 = \varphi\Big|_{x_к > x_1} - \varphi\Big|_{x_к \le x_1},$$

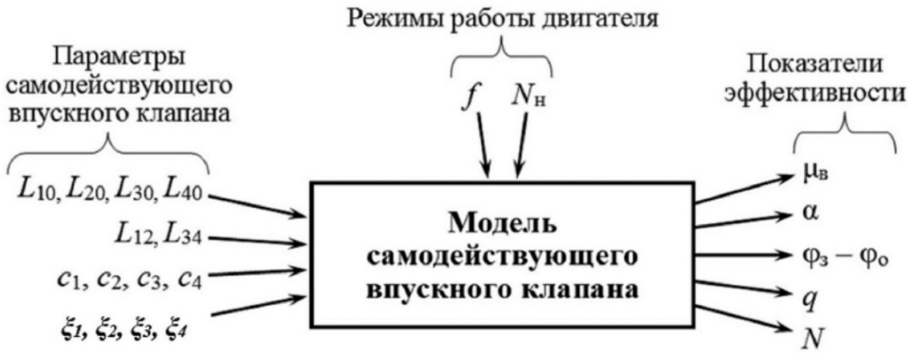


Рис. 6. Входные параметры и показатели эффективности разработанной математической модели

где ϕ — угловое положение коленчатого вала (фаза двигателя); $x_к$ — координата клапана вдоль оси его движения; x_1 — координата закрытого положения клапана.

Расход топлива двигателем рассчитывается по формуле:

$$q = \sum_{i=1}^{N_Э} F^{x}_{К\text{-}Э_i}.$$

Выходная мощность двигателя рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{1}{t_{КЭ}} \sum_{\tau=1}^{t_{КЭ}} \left(\left(z_п^{\tau} - z_п^{\tau-1} \right) \sum_{i=1}^{N_Э} F^{z}_{П-Э_i} \right),$$

где $t_{КЭ}$ — длительность компьютерного эксперимента; $z_п^{\tau}$ — координата поршня вдоль оси цилиндра на шаге τ интегрирования уравнений движения; $F^{z}_{П-Э_i}$ — вертикальная компонента силы, действующей между элементом *i* и поршнем.

Выводы

Таким образом, разработанная физико-математическая модель поршневого ДВС с самодействующими впускными клапанами, позволяет с высокой достоверностью определить рациональные параметры самодействующего впускного клапана.

При помощи разработанной компьютерной программы реализуется модель поршневого ДВС, для теоретического исследования эффективности самодействующего впускного клапана с различными конструктивными и технологическими параметрами, и определения его рациональных параметров.

В процессе дальнейшего теоретического исследования необходимо установить влияние перечисленных параметров самодействующего впускного клапана и режимов работы двигателя на показатели эффективности клапана $\mu_В$, α, $\varphi_3 - \varphi_0$, *q*.

Литература

1. Степанов В.В. Состояние и тенденции развития танковых парков России и стран НАТО до 2025 года / В.В. Степанов, Е.Н. Зайцев // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 4 (87). С. 43–49.

2. Разработка типажа первичных двигателей источников электрической энергии для ВС РФ на период до 2025 года: Отчет КНИР (заключительный) // НИИЦ «3 НИИИ МО РФ». — Кубинка. 2013. 139 с.

3. Совершенствование конструкции поршневых двигателей вспомогательных силовых установок за счет применения самодействующих впускных клапанов: Отчет НИР (заключительный) // Филиал ВА МТО. — Омск. 2021. 112 с.

4. Заявка на полезную модель № 2021132459 Российская Федерация. Четырехтактный дизельный двигатель с самодействующим нормально открытым впускным тарельчатым клапаном. Заявл. 08.11.2021; заявитель Н.С. Черепанов.

5. Черепанов Н.С. Моделирование поршневого ДВС с самодействующими впускными клапанами / Н.С. Черепанов, С.Ю. Шелпаков, М.А. Солодов // Наука и военная безопасность. 2021. № 3 (26). С. 39–46.

6. Кривцов А.М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого

тела / Кривцов А.М., Кривцова Н.В. // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. 2002. Т. 3. № 2. С. 254–276.

7. Паршиков А.Н. Численный метод SPH, использующий соотношения распада разрывов, и его применение в механике деформируемых гетерогенных сред: дисс. докт. физ.-мат. наук. — Москва. 2013. 202 с.

8. Allen M.P., Tildesley D.J. Computer Simulation of Liquids. — Oxford: Clarendon Press. 1987. 408 p.

9. Марьин Д.Ф. Методы ускорения расчетов математических моделей молекулярной динамики на гибридных вычислительных системах: дисс. канд. физ.-мат. наук. — Уфа. 2015. 146 с.

10. Кураев А.А. Быстрый алгоритм численного интегрирования уравнений движения крупных частиц в приборах СВЧ / Кураев А.А., Рак А.О., Колосов С.В., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 3. С. 8–13.

11. Бабуркин П.О. Моделирование процесса гелеобразования в цистеин-серебряном растворе методом диссипативной динамики частиц / Бабуркин П.О., Комаров П.В., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 5. С. 572–581.

References

1. Stepanov V.V. State and trends in the development of tank fleets in Russia and NATO countries until 2025 / V.V. Stepanov, E.N. Zaitsev // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2015. № 4 (87). P. 43–49.

2. Development of the type of prime movers of electrical energy sources for the Armed Forces of the Russian Federation for the period up to 2025: Report of the KNIR (final). // NIITS «3 NII MO RF». — Kubinka. 2013. 139 p.

3. Improving the design of piston engines of auxiliary power plants through the use of self-acting inlet valves: Research report (final) // Branch of VA MTO. — Omsk. 2021. 112 p.

4. Application for utility model № 2021132459 Russian Federation. Four-stroke diesel engine with self-acting normally open inlet poppet valve. Appl. 08.11.2021; applicant N.S. Cherepanov.

5. Cherepanov N.S. Modeling of a piston internal combustion engine with self-acting inlet valves / N.S. Cherepanov, S.Yu. Shelpakov, M.A. Solodov // Science and military security. 2021. № 3 (26). P. 39–46.

6. Krivtsov A.M. Particle method and its use in solid mechanics / Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. // Far Eastern Mathematical Journal of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2002. T. 3. № 2. P. 254–276.

7. Parshikov A.N. Numerical SPH method using the discontinuity decay ratios and its application in the mechanics of deformable heterogeneous media.: diss. doc. Phys.-Math. Sciences. — Moscow. 2013. 202 p.

8. Allen M.P., Tildesley D.J. Computer Simulation of Liquids. — Oxford: Clarendon Press. 1987. 408 p.

9. Maryin D.F. Methods for accelerating calculations of mathematical models of molecular dynamics on hybrid computing systems: diss. cand. Phys.-Math. Sciences. — Ufa. 2015. 146 p.

10. Kuraev A.A. Fast algorithm for numerical integration of the equations of motion of large particles in microwave devices / Kuraev A.A., Rak A.O., Kolosov S.V., Koronovskiy A.A., Khramov A.E. // Journal of technical physics. 2014. T. 84. № 3. P. 8–13.

11. Baburkin P.O. Modeling of the process of gelation in a cysteine-silver solution by the method of dissipative particle dynamics / Baburkin P.O., Komarov P.V., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. // Colloid log. 2015. T. 77. № 5. P. 572–581.