

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Б.А. Шароглазов, О.Г. Машков, П.Б. Вакенгут

Кратко излагается метод автоматизированного выбора исходных данных для теплового, кинематического и динамического расчетов поршневых двигателей внутреннего сгорания, выполняемых с помощью ЭВМ (ПК). Описываются преимущества такого подхода. Приводятся примеры расчета давлений, температур и сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме поршневого двигателя применительно к случаю работы на режиме с полной нагрузкой. Делается вывод о целесообразности автоматизированного выбора исходных данных при выполнении расчетов в учебных целях и НИР.

Ключевые слова: поршневой двигатель, тепловая машина, тепловой расчет, степень форсирования, рабочий цикл, моделирование, исходные данные, параметр цикла, отношение теплоемкостей.

Создание поршневой тепловой машины (двигателя) невозможно без предварительного анализа ее рабочего цикла и процессов, протекающих в камере сгорания (КС), механизмах и системах. Сегодня созданию машин предшествует математическое описание и последующее численное моделирование таких процессов с помощью ЭВМ. Это обстоятельство требует использования соответствующих математических моделей и алгоритмов их реализации. Применительно к поршневым тепловым машинам, в частности, применительно к процессам, протекающим в их КС и механизмах, известно достаточно большое количество таких моделей. Среди них в первую очередь надо отметить модели расчета процессов сгорания и параметров рабочего цикла, разработанные отечественными учеными В.И. Гриневецким, Е.К. Мазингом, Н.Р. Брилингом, Б.С. Стечкиным и др. Предложенные ими модели нашли широкое применение в практике отечественного и мирового моторостроения [1, 2]. С течением времени эти модели совершенствовались, создавались новые, более точно описывающие особенности протекающих в двигателях процессов [1, 3, 4].

Одними из современных и с высокой точностью описывающих особенности процессов выгорания топлива и процессов цикла в целом являются модели, предложенные профессором И.И. Вибе [4]. Разработанный им метод моделирования сегодня распространен [1, 3]. Значимость и широкая распространенность результатов работ Вибе хорошо подчеркнута профессором Р.З. Кавтарадзе в недавно изданной им книге [1, с. 564]: «...в настоящее время модель Вибе является самой употребляемой из всех существующих моделей тепловыделения, а ее автор одним из самых цитируемых авторов в мире, работающих в области теории поршневых двигателей».

Отметим, что точность результатов исследования при численном моделировании процессов в значительной степени определяется точностью оценки численных значений тех параметров, которые должны быть названы в качестве начальных условий при моделировании соответствующего процесса. В большинстве случаев повышение достоверности расчетов связано с необходимостью увеличения количества исходных для расчетов данных. И, как правило, многие из исходных величин взаимообусловлены. Это обстоятельство должно быть учтено и связано с необходимостью анализа и последующего учета особенностей их взаимосвязей.

Так, при расчетном моделировании процессов в наддувном двигателе необходимо учитывать взаимосвязь степени форсирования наддувом (λ_n), определяемой отношением мощностей (или средних эффективных давлений цикла) наддувного двигателя к соответствующим значениям этих параметров при отсутствии наддува, со степенью повышения давления (π_k) рабочего тела (РТ) на выходе из компрессора. Иными словами, должно учитываться, что

$$\lambda = \frac{N_{ен}}{N_e} = \frac{P_{ен}}{P_e} = \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{1}{n_n}} = \pi_k^{\frac{1}{n_n}}. \quad (1)$$

В записанных соотношениях $N_{ен}$, N_e – мощности наддувного и безнаддувного двигателей соответственно; $P_{ен}$, P_e – соответствующие названным мощностям двигателей средние эффективные давления циклов; P_0 , P_k – давление на входе в компрессор (нагнетатель) и давление на выходе из него соответственно; n_n – показатель политропического процесса сжатия РТ в нагнетателе.

Учет обстоятельств, определяемых соотношениями (1), требует достаточно трудоемких предварительных вычислений. Это, применительно к случаю работы наддувной энергетической установки на установившихся режимах, вытекает из равенства мощностей турбины (N_T) и компрессора (N_K). Более подробная запись названного условия ($N_T = N_K$), см. например [3, 5], приводит к соотношению

$$\pi_k = \left(1 + \rho \tau \left[1 - \pi_T \frac{1-k_T}{k_T} \right] \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2)$$

Как раз этим соотношением очень наглядно отображается взаимообусловленность важнейших показателей качеств турбины и компрессора наддувочного агрегата: уровень степени понижения давления РТ ($\pi_T = P_T/P_{г.к}$, где P_T – давление на входе в турбину, а $P_{г.к}$ – за турбиной, при отсутствии глушителя его можно полагать равным P_0), текущего через турбину обуславливает соответствующие значения π_k и P_k компрессора.

В уравнении [2]

$$\rho = \frac{k_T}{k_T - 1} \frac{k - 1}{k} \frac{R_T}{R} - \quad (3)$$

параметр, характеризующий различие в качественных составах РТ, текущего через решетки компрессора и турбины;

$$\tau = \eta_{ГТН} \left(1 + \frac{1}{\alpha L'_0 \phi} \right) \frac{T_T}{T_0} - \quad (4)$$

параметр, определяемый степенью нагрузки энергетической установки.

В соотношениях (3), (4) k и k_T – показатели адиабаты (отношения теплоемкостей) для воздуха и выпускных газов, текущих через компрессор и турбину соответственно; R и R_T – соответствующие газовые постоянные; $\eta_{ГТН}$ – КПД газотурбинного нагнетателя; α – коэффициент избытка воздуха; L'_0 – теоретически необходимое количества воздуха для сжигания одного кг топлива (определяется химическим составом применяемого топлива); ϕ – коэффициент продувки КС; T_0 и T_T – температуры заряда во входном устройстве компрессора и на входе в турбину.

Оценка численных значений параметров ρ и τ , в соответствии с (3) и (4), требует предварительных вычислений, ибо оба параметра являются функциями ряда других. В частности, определяются значениями k , k_T , R_T , T_T , α . Здесь нужно отметить, что численное значение коэффициента избытка воздуха (как и величины степени сжатия ε) при выполнении расчетов определяется и задается оператором самостоятельно, исходя из целей и задач проводимого исследования. А вот численные значения других параметров (k , k_T , R_T , T_T) должны быть определены с учетом выбранного конкретного значения α .

На основании уравнений, предложенных в [4] для определения отношения теплоемкостей РТ, можно получить для подаваемого в цилиндр свежего заряда

$$k = 1,259 + \frac{153,4}{T_k + T_0}. \quad (5)$$

Расчет и конструирование

Для выпускных газов на входе в турбину турбокомпрессора отношение теплоемкостей γ определяется по формуле:

$$k_{\gamma} = 1,259 + \frac{76,7}{T_{\gamma}} - \left(0,5 + \frac{3,72}{\alpha} \right) \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

В (5) T_{κ} – температура свежего заряда на выходе из компрессора определяется из условий политропического сжатия заряда: $T_{\kappa} = T_0 \cdot \pi_{\kappa}^{\frac{n_{\kappa}-1}{n_{\kappa}}}$. Можно показать, что отношение газовых констант в (3) равно максимальному значению химического коэффициента молекулярного изменения, который, в свою очередь, определяется составом топлива и степенью нагрузки машины (т. е. значением α).

Например, для дизелей

$$\beta_{\max} = 1 + \frac{\left(\frac{H}{4} + \frac{O}{32} \right)}{\alpha \cdot L_0}, \quad (7)$$

где H , O – соответственно массовые доли водорода и кислорода в топливе; L_0 – теоретически необходимое количество воздуха в молях для сжигания кг топлива.

В уравнения (4) и (6) входит температура рабочего тела во впускном патрубке турбины. Может быть сделана численная оценка этой температуры на основании данных статистического анализа. В частности, значение этой температуры определяется режимом нагрузки двигателя, значит, и величиной α . Эта взаимосвязь отображается статистическим соотношением, см. например (3): $T_{\gamma} = a \cdot \alpha^b + c$, в котором a , b , c – параметры, определяемые типом КС и способом смесеобразования (например, для полуразделенной КС с объемно-плочным смесеобразованием, широко применяемой в дизелях, коэффициенты a , b , c могут быть приняты равными 832; $-1,1$ и 304 соответственно).

Важными компонентами исходных данных применительно к задаче моделирования процессов в поршневых тепловых машинах являются параметры, характеризующие динамику процессов выделения теплоты в период горения. При моделировании по И.И. Вибе, а, как уже отмечалось, модель, им предложенная, относится к широко распространенным, к таким параметрам следует отнести продолжительность сгорания (φ_z) и показатель характера сгорания (m). Оценка численных значений названных параметров также может быть сделана на основе обобщения статистического материала по исследованию процессов в поршневых машинах. Так, для дизелей φ_z в функции коэффициента избытка воздуха отображается соотношением, см. (3)

$$\varphi_z = 135\alpha^{-1,36} + 25 \text{ град ПКВ},$$

для бензиновых двигателей

$$\varphi_z = 30 + 6 \cdot 10^{-3} n - 15 \cdot \varphi_{\text{др.з.}}^{-0,4},$$

где n – частота вращения, мин^{-1} ; $\overline{\varphi}_{\text{др.з.}} = \varphi_z / \varphi_{z,\max}$ – степень раскрытия дроссельной заслонки; φ_z и $\varphi_{z,\max}$ – промежуточная (определяется режимом частичной нагрузки) и максимальная фазы раскрытия заслонки.

Численное значение показателя характера сгорания (для бензиновых двигателей) может быть определено исходя из приводимого соотношения (установлено на базе статистического обобщения материалов исследований)

$$m = 6,5 - 2,5 \overline{N}_e - \overline{n}.$$

В записанном выражении $\overline{N}_e = N_e / N_{\text{ен}}$, $\overline{n} = n / n_{\text{н}}$ относительные значения мощности и частоты вращения по отношению к значениям этих параметров ($N_{\text{ен}}$ и $n_{\text{н}}$) при работе двигателя на номинальном режиме.

Приведенные в статье соотношения позволяют учитывать объективно существующую взаимосвязь параметров, оценка численных значений которых необходима при моделировании процессов, протекающих в КС тепловых машин, уже на стадии их (машин) предпроектной разработки.

Использование рассмотренных соотношений позволяет облегчить и автоматизировать процедуру выявления численных значений исходных параметров. Применительно к моделированию процессов в комбинированных (наддувных) энергетических установках с поршневыми двигателями соответствующие алгоритмы и программы расчета процессов, и цикла в целом, разработаны и включены в государственный реестр программ для ЭВМ [6–8].

Здесь целесообразно отметить, что результаты автоматизированной оценки численных значений параметров для соответствующих расчетов выдаются, при пользовании упомянутым комплексом программного обеспечения, на дисплей для просмотра их пользователем. Пользователь, если сочтет это необходимым, может внести изменения (коррективы) в их значения, исходя из собственных соображений и задач исследования.

Среди названного комплекса программного обеспечения опорным, в том смысле, что он формирует базу для кинематического и динамического расчетов двигателя, является тепловой расчет [6], результаты которого становятся исходными для работы соответствующего программного обеспечения [8].

В программе теплового расчета цикла (определение давлений и температур PT) в качестве основной модели сгорания использовано уравнение Вибе (закон сгорания И.И. Вибе, Wiebe-Brenngesetz [9]). Вместе с тем предусмотрена возможность использования и других уравнений для описания сгорания, в том числе и возможность задания характеристик выгорания топлива численным (табличным) методом. Предложенные программы расчета при желании исполнителя такую процедуру позволяют реализовать относительно просто.

Предложенный программный комплекс позволяет выполнить моделирование процессов изменения давления, температуры PT , других параметров, таких как функции времени или угла поворота коленчатого вала двигателя, определить характер изменения кинематических и динамических показателей двигателя при его работе на интересующих исследователя режимах.

Некоторые из названных возможностей предложенного программного обеспечения изображены на рис. 1–3.

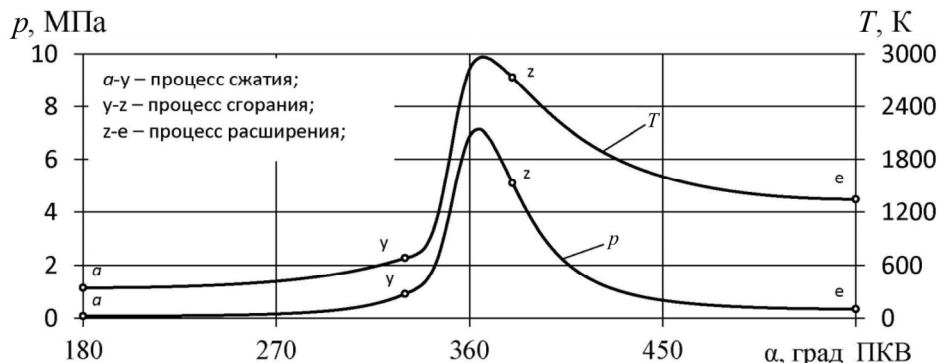


Рис. 1. Характер изменения давлений p и температур T рабочего тела при работе бензинового двигателя на режиме с полной нагрузкой. Основные исходные данные: $\alpha = 0,9$; $\epsilon = 9,5$; $n = 5400 \text{ мин}^{-1}$

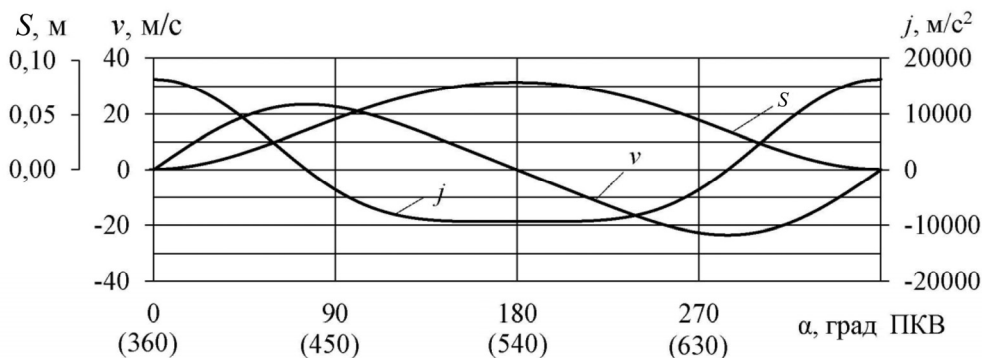


Рис. 2. Перемещение S , скорости v и ускорения j поршня двигателя при работе на режиме с полной нагрузкой $n = 5400 \text{ мин}^{-1}$. Исходные данные: см. рис. 1

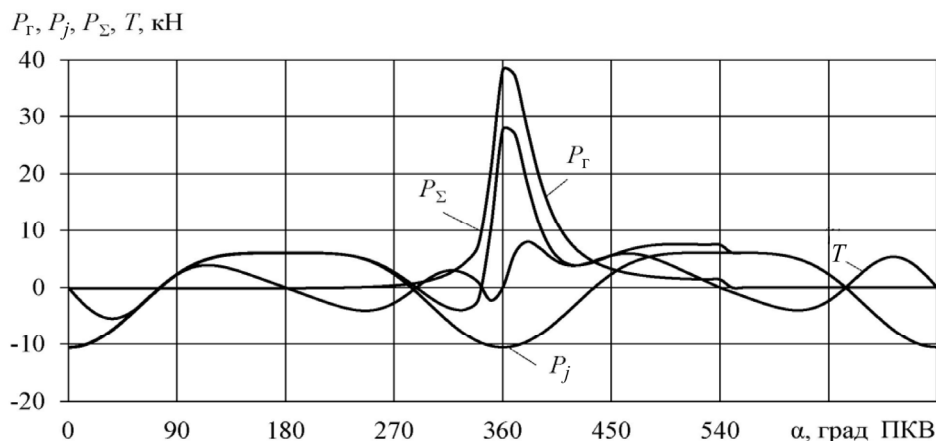


Рис. 3. Характер изменения сил, действующих в КШМ двигателя на режиме полной нагрузки: P_g – сила давления газов, P_j – сила инерции, P_Σ – суммарная сила, нагружающая поршень, T – тангенциальная сила. Исходные данные: см. рис. 1

Использование приведенных соотношений и последовательности действий позволяет заметно сократить затраты времени на процедуру оценки численных значений исходных данных при выполнении теплового, кинематического и динамического расчетов двигателя, повысить степень объективности оценки этих параметров за счет учета их взаимосвязей. Кроме того, эта процедура может быть автоматизирована, что уже сделано авторами. Предложенные авторами программы для ЭВМ включены в государственный реестр программ и могут быть использованы в учебных целях и при выполнении научно-исследовательских работ.

Литература

1. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. для вузов / Р.З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 375 с.
3. Шароглазов, Б.А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов: учеб. по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; под ред. заслуж. деят. науки РФ, проф., д-ра техн. наук Б.А. Шароглазова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 525 с.
4. Вибе, И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя / И.И. Вибе. – М.; Свердловск: Машигиз, 1962
5. Теория двигателей внутреннего сгорания: учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Г.В. Мельников и др.; под ред. Н.Х. Дьяченко. – М.; Л.: Машиностроение, 1965. – 459 с.
6. Машков, О.Г. Тепловой расчет рабочего цикла поршневых тепловых машин (двигателей) / О.Г. Машков, Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; Свидетельство № 2011614351 об официальной регистрации программы для ЭВМ; 2.06.2011, М.
7. Машков, О.Г. Автоматизированный выбор исходных данных для теплового расчета поршневых тепловых машин (двигателей) / О.Г. Машков, Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; Свидетельство № 2012616587 об официальной регистрации программы для ЭВМ; 23.07.2012, М.
8. Машков, О.Г. Кинематический и динамический расчет поршневых тепловых машин (двигателей) / О.Г. Машков, Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; Свидетельство № 2012618001 об официальной регистрации программы для ЭВМ; 5.09.2012, М.
9. Wiebe, I.I. Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren / I.I. Wiebe. – Berlin: Vebverlagstechnik, 1970.

Шароглазов Борис Александрович. Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). E-mail: g389@mail.ru

Машков Олег Григорьевич. Аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). E-mail: migro25@mail.ru

Вакенгут Полина Борисовна. Магистрант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). E-mail: vakengutpb@mail.ru

THE AUTOMATED ASSESSMENT OF VALUES OF INITIAL PARAMETERS AT NUMERICAL MODELING OF PROCESSES IN PISTON ENGINES

B.A. Sharoglazov, O.G. Mashkov, P.B. Vakengut

In article is briefly stated the method of the automated choice of basic data for thermal, kinematic and dynamic calculations of the piston internal combustion engines which are carried out by means of the computer (PC). Advantages of such approach are described. Examples of calculation of pressure, temperatures and forces operating in the connecting rod gear of piston thermal cars in case of their work with an full load are given. The conclusion is drawn on expediency of the automated choice of basic data when performing calculations in the educational purposes and research works.

Keywords: piston engine, thermal car, thermal calculation, extent of speeding up, work cycle, modelling, basic data, cycle parameter, relation of thermal capacities.

Boris A. Sharoglazov. The Doctor of Engineering, the professor, the honored worker of science of the Russian Federation, professor the chair of «Internal combustion engines», South Ural State University (Chelyabinsk). E-mail: g389@mail.ru

Oleg G. Mashkov. The post-graduate student of chair «Internal combustion engines», South Ural State University (Chelyabinsk). E-mail: migro25@mail.ru

Paulina B. Vakengut. The undergraduate of chair «Internal combustion engines», South Ural State University (Chelyabinsk). E-mail: vakengutpb@mail.ru

Поступила в редакцию 5 февраля 2013 г.