

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ  
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
С УЧЕТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЗВЕНЬЕВ**

**Дракунов Ю.М., Тулешов Е.А.**

*Институт механики и машиноведения, Алматы, Казахстан, [eakr.info@gmail.com](mailto:eakr.info@gmail.com)*

***Аннотация:** Приведены численные расчеты и их сравнение с экспериментальными данными по динамической модели работы двигателя внутреннего сгорания.*

***Ключевые слова:** потенциальная энергия, термодинамическое давление, шатун, диаграмма, кривошипно-ползунный механизм, интеграл уравнения.*

**AUTOMATED ANALYSIS OF DYNAMICS INTERNAL  
COMBUSTION ENGINE TAKING INTO ACCOUNT  
THE ELASTIC PROPERTIES OF THE LINKS**

**Drakunov Yu.M., Tuleshov E.A.**

*Institute of mechanics and machine science, Almaty, Kazakhstan*

***Annotation:** Numerical calculations and their comparison with experimental data on the dynamic model of the internal combustion engine are presented.*

***Key words:** potential energy, thermodynamic pressure, connecting rod, diagram, crank-slide mechanism, integral of the equation.*

Схема кривошипно-ползунного механизма ДВС, диаграмма работы двигателя и его динамическая модель приведены на рис. 1, а на верхнем правом углу. Упругими элементами модели ДВС являются коленчатый вал, работающий на кручение и шатун, испытывающий деформации растяжения/сжатия.

Приведенные параметры  $c_n$  и  $c'_n$  при условии, что шатун и вал двигателя являются упругими, определяются из формул, полученных из равенства потенциальных энергий звена приведения и исходного механизма

$$c_3 c_2 \chi^2 = \dots, \quad dc_n = \dots$$

Уравнение для дополнительной неизвестной величины – термодинамического давления – выводится из уравнения сохранения энергии и имеет вид [2]

$$\frac{dP_t}{dt} = -\frac{\kappa P_t}{V} \int_{\bar{S}} \bar{v} \cdot d\bar{S} + \frac{\kappa-1}{\kappa} \left[ \int_{\bar{S}} \lambda \nabla T \cdot d\bar{S} + Q \int \dot{w} dV \right]$$

здесь  $V = S_p L$  – объем камеры сгорания;  $\bar{S}$  – ее поверхность;  $v$  – скорость газа;  
 $Q = -\sum v_i h_i^0$

Уравнение (2) является достаточно общим – не зависит от формы области и пригодно для расчетов как ламинарного, так и турбулентного течений с соответствующими коэффициентами переносов и законов горения [2].

Несложные вычисления показывают, что на такте впуска этот член вследствие

После открытия выпускного клапана происходит изоэнтропическое истечение газа из камеры сгорания и первый интеграл уравнения (2) имеет вид.

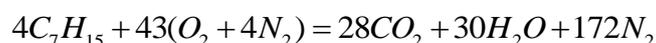
$$\int_S \bar{v} \cdot d\bar{S} = v_e S_e + v_p S_p, \text{ где } v_e S_e = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \sqrt{\kappa} S_e \sqrt{\frac{P_t}{\rho}}; \quad \rho = \rho_e \left( \frac{P_t}{P_e} \right)^{1/\kappa}$$

Г  
Д  
Е

$$r \dots \dots dn \quad M_f \pi \omega \quad \dots \left[ \pi(\alpha - \alpha_0) \right]$$

где  $\eta$  - доля выгораемого топлива;  $M_f$  - масса топлива, сгорающего на одном цикле;  $\alpha_0, \alpha_1$  - начальный и конечный углы горения топлива.

Масса топлива  $M_f$  может быть определена из реакции окисления стехиометрической бензино-воздушной смеси.



Окончательно дифференциальные уравнения для давления  $P_t$  и плотности  $\rho$  в камере сгорания при  $0 \leq \alpha \leq 4\pi$  могут быть записаны в следующем виде

$$\dot{P}_t = \frac{dP_t}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\alpha < \alpha_+) \vee [(\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t < 2P_0)] \\ -\kappa P_t \left( \frac{c}{LS_p} \sqrt{\frac{P_t}{\rho}} + x' \dot{\alpha} / L \right), & \text{если } (\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t \geq 2P_0) \\ -\kappa x' P_t \dot{\alpha} / L, & \text{если } \alpha_+ \leq \alpha \leq \alpha_0, \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_- \\ -\kappa x' P_t \dot{\alpha} / L + \frac{\kappa-1}{LS_p} \frac{QM_f \dot{\alpha} \pi}{2(\alpha_1 - \alpha_0)} \sin \left[ \frac{\pi(\alpha - \alpha_0)}{\alpha_1 - \alpha_0} \right], & \text{если } \alpha_0 < \alpha < \alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\dot{\rho} = \frac{d\rho}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\alpha < \alpha_+) \vee [(\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t < 2P_0)] \\ -\rho \left( \frac{c}{LS_p} \sqrt{\frac{P_t}{\rho}} + x' \dot{\alpha} / L \right), & \text{если } (\alpha > \alpha_-) \wedge (P_t \geq 2P_0) \\ -\rho x' \dot{\alpha} / L, & \text{если } \alpha_+ \leq \alpha \leq \alpha_- \end{cases} \quad (4)$$

$$c = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} S_e \sqrt{\kappa}.$$

Примем за обобщенные координаты углы поворота маховика  $\varphi$  и кривошипа  $\alpha$ .

На основе уравнений Лагранжа второго рода дифференциальные уравнения движения механической части двигателя внутреннего сгорания с упругой связью запишем в виде системы

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + c_n(\varphi - \alpha) = -M_c \\ J_n\ddot{\alpha} + \frac{1}{2}J'_n\dot{\alpha}^2 - c_n(\varphi - \alpha) + \frac{1}{2}c'_n(\varphi - \alpha)^2 = [(P_t - P_k)S_p + m_1g]x' \end{cases} \quad (5)$$

В этих уравнениях  $J$  - момент инерции маховой массы;  
 $c_n, c'_n$  - приведенная жесткость вала и ее производная по углу поворота кривошипа  $\alpha$ ;

$J_n, J'_n$  - приведенный момент инерции механизма к кривошипу и его производная;

$m_1$  - масса поршня;

$M_c$  - момент сопротивления на валу двигателя;

$P_t$  - давление в камере сгорания (КС);

$P_k$  - давление в картере;

$S_p$

площадь поршня,  $g$  - ускорение свободного падения.

Таким образом, динамика двигателя внутреннего сгорания описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (5), (3) и (4) с начальными условиями

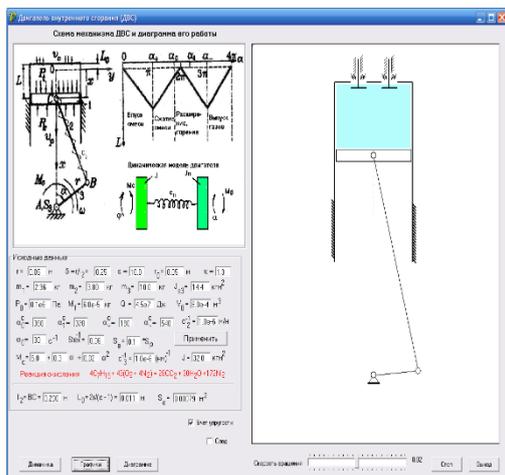
На рисунке 1 приведено диалоговое окно системы компьютерного моделирования по исследованию процесса работы ДВС.

Слева, на рисунке 1,а изображены модель ДВС с циклограммой движения и панель для задания исходных данных, а справа, на рисунке 1,б, отображается процесс движения кривошипно-ползунного механизма в динамическом режиме.

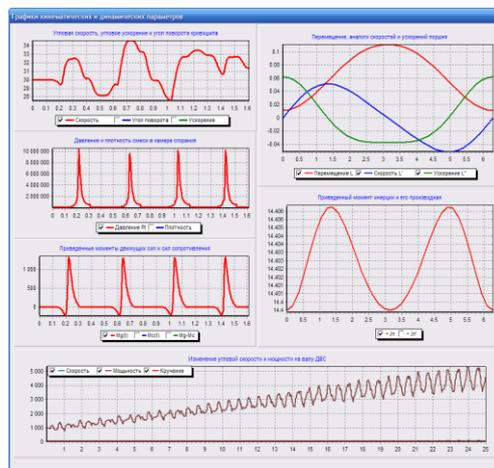
Имеется возможность ключения /отключения флага для учета упругости звеньев в динамической модели.

По нажатию кнопки «Динамика» происходит решение вышеуказанных дифференциальных уравнений и отображение полученных результатов в численной и графической формах.

По нажатию кнопки «Графики» отображается диалоговое окно с графическим представлением характерных кинематических и динамических параметров (рисунок 1,б). Численные результаты записываются в текстовый файл.



а)



б)

Рис. 1. Диалоговые окна АС исследования ДВС с учетом упругих свойств звеньев

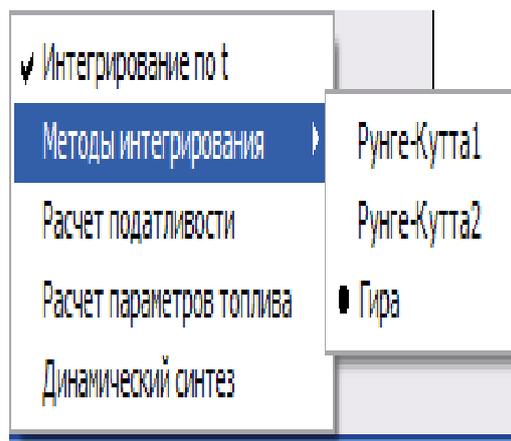
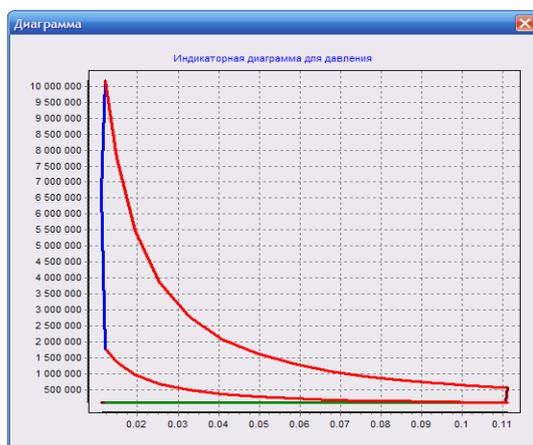


Рис. 2. Индикаторная диаграмма и поп-меню для расчета параметров

На диалоговом окне можно получить рассчитанную индикаторную диаграмму для давления в КС (рисунок 2), которая показывается на экране при нажатии кнопки «Диаграмма», а также представлено всплывающее меню по настройке методов интегрирования и расчета некоторых важных параметров: податливостей упругих элементов [4]; основных параметров сжигаемого топлива и некоторых других динамических параметров.

Система показывает фрагменты графического интерфейса, отображающие колебание упругого вала ДВС и характер изменения угловой скорости коленчатого вала без учета и с учетом упругих параметров исследуемой динамической модели, как это представлено на рисунке 3.

Далее в системе проводится оценка прочности упругого вала и шатуна.

Проведенные численные расчеты и их сравнение с известными экспериментальными данными подтверждают достоверность предложенной динамической модели работы двигателя внутреннего сгорания.

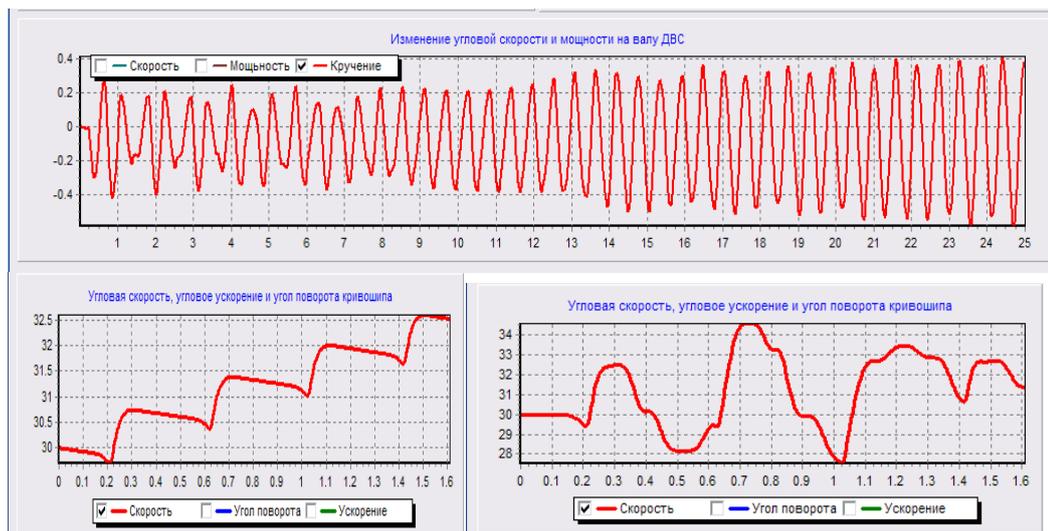


Рис. 3. Колебание упругого вала и изменение угловой скорости за счет упругости

Как показали компьютерные исследования на такте расширения (горения) происходит резкое увеличение давления в КС и угловой скорости вала двигателя и что с уменьшением продолжительности горения происходит увеличение мощности двигателя. На выше названные параметры так же значительно сказывается и учет упругости коленчатого вала ДВС.

### Использованная литературы

1. Вейц В.Л., Кочура А.Е. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания. – Машиностроение, – Л., 1976.

2. Дракунов Ю.М., Калтаев А. Динамическая модель работы четырехтактного одноцилиндрового ДВС //Вестник КазНТУ – №1, – Алматы, 1996. – С.15-19.

3

Тулешов А.К., Дракунов Ю.М. Моделирование динамики и оценка прочности двигателя А. В. Гут. Сопротивление материалов. 1996. №1. С. 15-19. Конференция «Повышение качества, надежности и долговечности технических систем и технологических процессов», Хугада, – Египет, 2009. – С.56-62.

m  
b  
u  
s  
t  
i  
o  
n  
  
a  
n  
d

