

*Хоанг Куанг Лыонг, А. Ф. Дорохов*

## КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА БЕСШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Современный уровень развития техники требует совершенствования двигателей внутреннего сгорания с целью повышения КПД и экономичности, снижения уровня вибрации и шума и улучшения массогабаритных показателей. Перспективным направлением улучшения показателей двигателей внутреннего сгорания является поиск новых решений их конструкции. Бесшатунный механизм позволяет конструктивно просто осуществлять двусторонний рабочий процесс при малых габаритах и высокой быстроходности двигателей. Приведена кинематическая схема бесшатунного механизма преобразования движения. По теоретическому исследованию определены принцип действия и конструктивная схема бесшатунного механизма преобразования движения, что позволило выявить особенности кинематических и динамических характеристик бесшатунного двигателя. Приведены уравнения перемещения поршня, уравнения скорости и ускорения данного механизма. Рассмотрены характеристики динамики механизма; силы инерции механизма, сила инерции поступательно движущихся масс, центробежная сила инерции кривошипа, силы давления газа и суммарные силы, действующие в механизме. По результатам исследования динамики определен метод уравнивания сил инерции и их моментов. Результаты исследования позволяют определить комплексную взаимосвязь процессов, протекающих в механизмах бесшатунных двигателей, и особенности термодинамического цикла бесшатунного двигателя.

**Ключевые слова:** кинематика, динамика, бесшатунный механизм, преобразование движения, возвратно-поступательное движение, вращательное движение, ползун, направляющая кулиса, поршень, скорость, ускорение, сила, момент, уравнивание.

### Введение

В настоящее время требования к экологичности и экономичности производимых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) становятся наиболее эффективным способом борьбы за рынки сбыта продукции, использующей ДВС в качестве силового агрегата.

Однако резервы совершенствования ДВС традиционными высокотехнологичными способами использованы практически до предела, поэтому необходим поиск новых решений.

В России и за рубежом в качестве источников механической энергии преобладают поршневые кривошипно-шатунные двигатели. Это объясняется их высокой экономичностью и хорошими мощностными показателями. Однако эти двигатели имеют и существенные недостатки: конструктивная сложность; значительное количество деталей; большое число сопряжений, работающих с трением скольжения; сложность; трудоемкость; дороговизна технологии производства.

Однако, несмотря на широкое распространение кривошипно-шатунных двигателей, вопросы улучшения технико-экономических и массогабаритных показателей поршневых ДВС за счет использования резервов, предоставляемых кинематическими схемами преобразующих механизмов, отличными от кривошипно-шатунной, остаются в настоящее время относительно мало разработанными как в теории, так и на практике [1].

Одно из решений проблемы – применение бесшатунных механизмов преобразования движения (БМПД).

Схема, кинематика, динамика и компоновка БМПД имеют ряд принципиальных отличий от таковых кривошипно-шатунных механизмов (КШМ).

Бесшатунный механизм дает возможность конструктивно просто осуществлять двусторонний рабочий процесс при малых габаритах и высокой быстроходности двигателей в цилиндрах, что позволяет получить почти удвоенную литровую и габаритную мощность.

При использовании бесшатунного механизма полностью исключается трение поршней о стенки цилиндров и значительно снижаются нагрузки и трение в кинематических парах механизма на единицу развиваемой мощности. Благодаря этому у бесшатунных двигателей, по сравнению с аналогичными кривошипно-шатунными, в несколько раз снижаются суммарные потери мощности на трение, значительно увеличивается КПД, повышаются экономичность, надеж-

ность и создаются благоприятные условия для увеличения моторесурса двигателей и их дальнейшего форсирования по наддуву, числу оборотов и средней скорости поршня [2].

К преимуществам БМПД относится и полное отсутствие боковых сил, действующих на поршень и стенку цилиндра, и сил инерции порядков выше первого, что уменьшает износ деталей, существенно упрощает, а во многих случаях исключает необходимость в уравнивании, и повышает равномерность хода двигателя [3].

Все построенные бесшатунные двигатели имели по сравнению с аналогичными кривошипно-шатунными двигателями равной мощности в несколько раз меньшие габариты, большую литровую мощность, меньший удельный расход топлива, меньшую удельную массу конструкции и увеличенный моторесурс.

Таким образом, необходимость существенного улучшения показателей тепловых двигателей (прежде всего, массогабаритных) обуславливает целесообразность научных исследований в области БМПД.

### Конструктивная схема бесшатунного механизма преобразования движения

История развития бесшатунных поршневых двигателей берет начало в 30–40-х гг. XX в., когда в конструкторском бюро, где работал предложивший их С. С. Баландин, было сконструировано и построено несколько типов авиационных двигателей с необычным, отличным от кривошипно-шатунного, силовым механизмом. Конструктивные схемы приведены в [2–8].

В Лаборатории проблем моторной энергетики кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» Астраханского государственного технического университета ведётся исследование рядного бесшатунного механизма (рис. 1, 2).

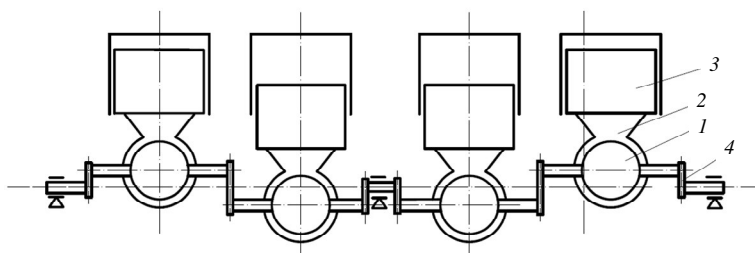


Рис. 1. Принципиальная схема бесшатунного механизма преобразования движения:  
1 – ползун; 2 – направляющая кулиса; 3 – поршень; 4 – коленчатый вал



Рис. 2. Макет бесшатунного механизма преобразования движения

На кривошипные шейки коленчатых валов посажены ползуны 3, движущиеся по направляющей кулисе 2, которая при помощи штока 1 соединена с поршнем. В процессе движения поршень взаимодействует с ползуном, который, наряду с прямолинейным возвратно-поступательным движением вдоль собственной оси, совершает вращательное движение.

**Кинематика и динамика бесшатунного механизма преобразования движения**

В исследуемом БМПД поршень, шток и кулиса совершают только возвратно-поступательное движение, коленчатый вал – вращательное, ползуны – сложное возвратно-поступательное и вращательное движение.

При динамическом расчете будем рассматривать случай установившегося движения, когда угловая скорость вращения валов постоянна. Такое допущение позволяет учитывать центробежные силы инерции, которые возникают только при дисбалансе вращающихся масс [4, 6, 7].

*Кинематическая схема и принцип работы БМПД.* На рис. 3 показана кинематическая схема механизма.

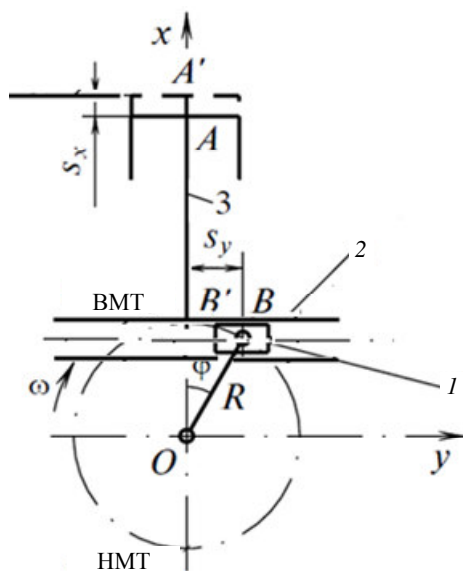


Рис. 3. Схема кинематики БМПД:

- $1$  – ползун;  $2$  – направляющая;  $3$  – шток и поршень;  $R = OB$  – радиус кривошипа;
- $\varphi$  – угол поворота кривошипа от его начального положения;
- $n$  – число оборотов кривошипа;  $\omega$  – угловая скорость вращения кривошипа;
- $t$  – время поворота кривошипа от его начального положения до рассматриваемого;
- $S_x = A'A$  и  $S_y = B'B$  – перемещение соответственно поршня и ползуна при повороте кривошипа на угол  $\varphi$ ;  $v_x, v_y$  – скорость движения поршня и ползуна;
- $j_x, j_y$  – ускорение поршня и ползуна;
- $S = 2R$  – ход поршней от верхней мертвой точки (ВМТ) до нижней мертвой точки (НМТ)

Бесшатунный механизм преобразования движения разделён на 2 группы. Первая группа – поршень со штоком 3 и направляющая кулиса 2. Вторая группа – кривошип  $OB$  и ползун 1. Кривошип  $OB$  вращается вокруг оси  $O$ . Поршни и цилиндры при этом не касаются один другого и полностью освобождены от боковых сил при работе двигателя.

Координаты точки  $B$  при произвольном положении, когда он расположен по отношению к оси  $Ox$  под некоторым углом  $\varphi$ :

$$y_B = R \sin \varphi,$$

$$x_B = R \cos \varphi.$$

Тогда точка  $B$  всегда находится на постоянном расстоянии от начала координат (точки  $O$ ):

$$OB = \sqrt{y_B^2 + x_B^2} = R,$$

где  $R = OB$  – радиус кривошипа.

Принимая за начало перемещения поршня ВМТ, получим:

– для поршня:

$$S_x = R(1 - \cos \varphi), \tag{1}$$

– для ползуна:

$$S_y = R \sin \varphi . \quad (2)$$

Уравнение (1) показывает, что при вращении кривошипа  $OB$  движение поршня изменяется по закону косинуса. Вследствие этого такой механизм называют косинусным (или синусным, если отсчет угла  $\varphi$  производится от координатной оси  $Oy$ ).

При  $\frac{d\varphi}{dt} = \omega = \text{const}$ , после дифференцирования выражений (1), (2), найдем зависимости для скорости движения  $v_x$  поршня и скорости  $v_y$  ползуна по направляющим кулис:

$$v_x = R \omega \sin \varphi , \quad (3)$$

$$v_y = R \omega \cos \varphi . \quad (4)$$

Продифференцировав выражения (3) и (4), получим ускорения поршня и ползуна:

$$j_x = R\omega^2 \cos \varphi ,$$

$$j_y = -R\omega^2 \sin \varphi .$$

На рис. 4 показаны графики зависимостей перемещения, скорости и ускорения поршня от угла поворота коленчатого вала для БМПД. Там же, для сравнения, приведены кинематические функции КШМ с такими же конструктивными параметрами.

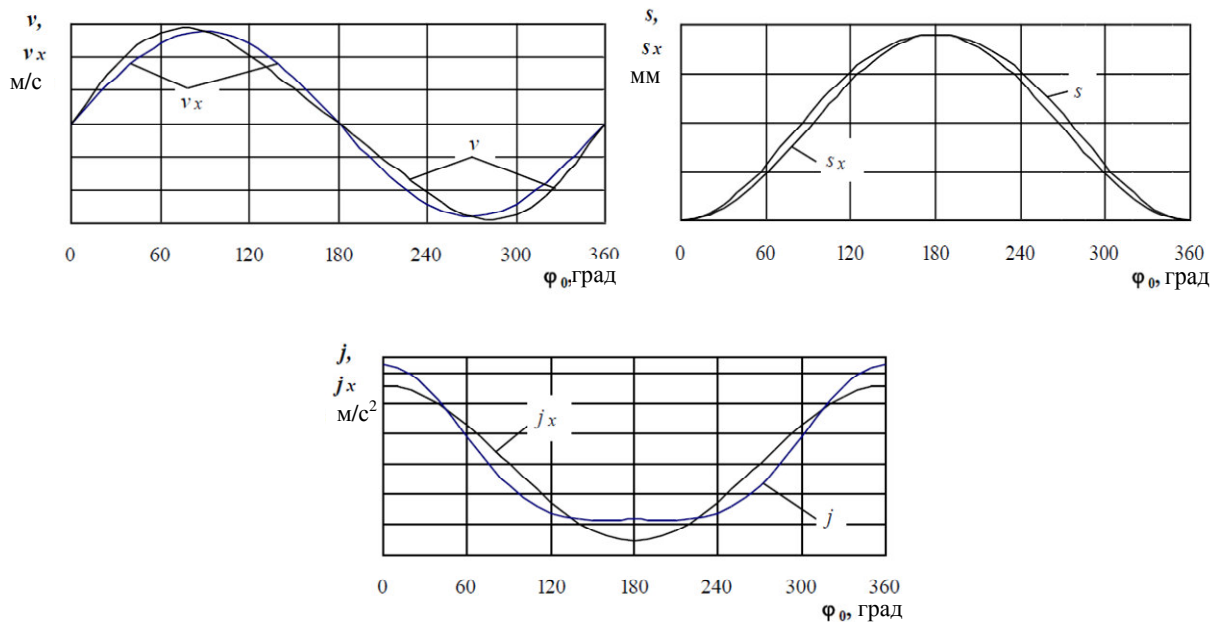


Рис. 4. Кинематические характеристики –  
 графики изменения перемещения, скорости и ускорения поршня:  
 $s_x, v_x, j_x$  – бесшатунного механизма;  
 $s, v, j$  – кривошипно-шатунного механизма

*Силы инерции БМПД.* Механизм можно заменить теоретической моделью, состоящей из двух сосредоточенных масс –  $m_j$  и  $m_R$  (рис. 5), совершающих простые движения – возвратно-поступательное и вращательное.

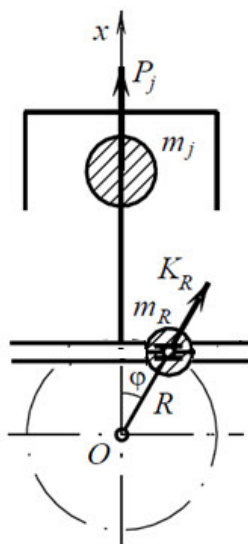


Рис. 5. Схема сил инерции в бесшатунном механизме преобразования движения

Масса  $m_j$  расположена на оси цилиндра и состоит из трех масс – поршневой группы, штока и направляющей кулисы в сборе. В дальнейшем будем относить эту массу условно к центру поршня [2].

В отличие от КШМ, в котором на коленчатом вале сосредоточена часть массы шатуна, в данном механизме на кривошипном пальце расположен ползун, поэтому для неуравновешенной массы вращающихся частей одного кривошипа справедливо соотношение

$$m_R = m_k + m_{\text{пол}},$$

где  $m_k$  – масса колена вала, приведенная к пальцу кривошипа;  $m_{\text{пол}}$  – масса ползуна в сборе.

Величина  $m_k$  определяется по известной из динамики КШМ формуле.

Сила инерции поступательно движущихся масс определяется из уравнения

$$P_j = -mR\omega^2 \cos \varphi.$$

Эта сила инерции зависит от угла  $\varphi$ , поэтому она изменяется периодически с частотой вращения валов.

Центробежная сила инерции каждого кривошипа направлена всегда по радиусу кривошипа и равна

$$K_R = -m_R\omega^2 R.$$

*Определение сил и реакций, действующих в БМППД.* Определение нагрузок на кинематические параметры бесшатунного механизма, возникающих в результате действия на механизм сил газов, сил инерции и их моментов, является наиболее сложной задачей в расчете бесшатунных двигателей.

Чтобы найти величины и направления результирующих сил, нагружающих кинематические характеристики бесшатунного механизма, необходимо знать не только величины сил газов  $P_g$  и сил инерции  $P_i$  движущихся масс механизма, но и величины и направления реакций на опорные поверхности ползуну  $X_i = f(\varphi)$  [1]. Все силы и реакции представлены на рис. 6.

*Силы давления газа.* Силы давления газа определяют из индикаторной диаграммы, построенной по данным теплового расчета или снятой с работающего двигателя.

Силу давления газов на поршень в верхней камере сгорания определяют по формуле

$$P_r = \frac{\pi D^2}{4} p_r,$$

где  $D$  – диаметр цилиндра;  $p_r$  – давление газов.

Величины давлений газов в двигателе являются функцией угла поворота кривошипа и определяются из соответствующих индикаторных диаграмм:  $p_r = f(\varphi)$ .

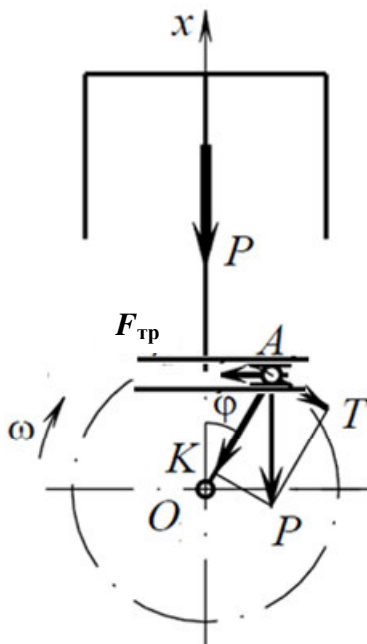


Рис. 6. Схема действия сил в бесшатунном механизме преобразования движения

*Суммарные силы, действующие в БМПД.* К центру поршня, помимо силы  $P$ , приложена также сила инерции  $P_j$  частей БМПД, движущихся возвратно-поступательно, что дает суммарную силу, которая действует вдоль оси цилиндра:

$$P = P_r + P_j.$$

График изменения этой силы по углу  $\varphi$  зависит от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

В бесшатунном двигателе суммарная сила  $P$  воспринимается ползунами, перемещающимися по направляющим кулис. Разложим эту силу по двум направлениям: вдоль оси кривошипа:  $K = P \cos \varphi$ ; перпендикулярно к силе  $K$ :  $K = P \sin \varphi$ .

Сила трения воздействует на ползун вдоль направляющей кулисы и, являясь функцией силы  $P$  и коэффициента трения  $f$ , определяется по формуле

$$F_{\text{тр}} = Pf.$$

Согласно рис. 6, сила  $T$  образует момент относительно центра вращения  $O$  кривошипа:

$$M = TR.$$

Это и является крутящим моментом. Величина крутящего момента на выходном валу, развиваемого одноцилиндровым двигателем, будет равна:

$$M = P \cdot R \sin \varphi.$$

Сила  $F_{\text{тр}}$  направлена в сторону, противоположную направлению движения ползуна. Положительное направление сил  $P$ ,  $K$  и  $T$ , а также крутящего момента в бесшатунном двигателе совпадает с общепринятым в динамике классического ДВС правилом выбора знаков сил и моментов.

*Уравновешивание двигателя.* При работе бесшатунного двигателя в БМПД возникают силы инерции  $P_j$  поступательно движущихся масс и центробежные силы инерции  $K_R$  неуравновешенных вращающихся масс. В результате действия этих периодически изменяющихся сил корпус двигателя совершает колебательные движения [4].

Вибрации двигателя всегда имеют место из-за действия переменного реактивного момента.

*Уравновешивание сил инерции и их моментов.* Силы инерции являются свободными силами относительно корпуса двигателя, поэтому уравновесить их можно только другими силами инерции, изменяющимися по такому же закону, но имеющими противоположное направление.

*Уравновешивание силы  $K_R$ .* Центробежная сила вращающихся масс уравновешивается, как и в классическом ДВС, с помощью установки двух одинаковых противовесов на продолжении щек коленчатого вала. Эта сила инерции, независимо от числа цилиндров двигателя, должна быть полностью уравновешена, чтобы уменьшить нагрузки на коренные подшипники.

Масса противовеса для полного уравновешивания силы  $K_R$  определяется из условия

$$m_{\text{пр}} = m_R \frac{R}{\rho},$$

где  $\rho$  – расстояние от оси вращения вала до центра тяжести противовеса, служащего для уравновешивания силы  $K_R$ .

*Уравновешивание силы  $P_j$ .* В одноцилиндровом бесшатунном двигателе эта сила может быть полностью уравновешена конструктивно простым средством – размещением добавочных масс  $m$  (рис. 7) на продолжении щек кривошипа.

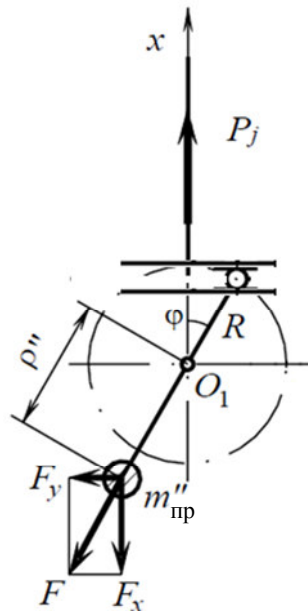


Рис. 7. Схема к уравновешиванию силы инерции

Общая масса при полном уравновешивании сил  $K_R$  и  $P_j$  равна:

$$m_{\text{пр}} = m'_{\text{тр}} + m''_{\text{тр}}.$$

Таким образом, в БМПД все силы и их моменты уравновешиваются полностью при помощи простого метода установки противовесов на коленчатых валах.

### Заключение

Анализ принципов действия конструктивной схемы БМПД позволяет выявить особенности его кинематических и динамических характеристик.

Основные уравнения кинематики и динамики, приведенные в работе, дают возможность охарактеризовать динамику процессов рабочего цикла, выявить характер протекания кинематических и динамических параметров БМПД, а также качественно и количественно оценить динамичность нагружения и определить характер влияния различных конструктивных параметров механизма на кинематические и динамические характеристики двигателя.

Результаты исследований позволяют определить комплексную взаимосвязь процессов, протекающих в механизмах бесшатунных двигателей и особенности термодинамического цикла бесшатунного двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клементьев В. В. Кинематика и динамика нетрадиционной бескривошипной поршневой тепловой машины: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Клементьев. Челябинск, 2002. 164 с.
2. Баландин С. С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания / С. С. Баландин. М.: Машиностроение, 1972. 175 с.
3. <http://altzero.ru/articles/033.php>.
4. Мищенко Н. И. Нетрадиционные малоразмерные двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. Т. 1. Теория, разработка и испытание нетрадиционных двигателей внутреннего сгорания / Н. И. Мищенко. Донецк: Лебедь, 1998. 228 с.
5. Зайкин О. А. Совершенствование приводов транспортно-технологических машин использованием зубчатого бесшатунного дифференциала: дис. ... канд. техн. наук / О. А. Зайкин. Волгоград, 2014. 173 с.
6. Мищенко Н. И. Особенности кинематики одноцилиндрового двигателя с двумя шатунами, соединенными с двумя коленчатыми валами / Н. И. Мищенко, А. В. Химченко // Отраслевое машиностроение: Тр. Тавр. гос. агротехн. акад. 1998. Т. 5, вып. 2. С. 22–25.
7. Мищенко Н. И. Кривошипно-кулисный механизм двухтактного бесшатунного двигателя малой мощности / Н. И. Мищенко // Отраслевое машиностроение: Тр. Тавр. гос. агротехн. акад. 1998. Т. 6, вып. 2. С. 33–35.
8. Мищенко Н. И. Перспективная конструкция бесшатунного двигателя внутреннего сгорания / Н. И. Мищенко // Автошляховик України. 1998. № 2. С. 16–17.

Статья поступила в редакцию 08.07.2015

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Хоанг Куанг Льюнг** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; [hquangluong@gmail.com](mailto:hquangluong@gmail.com).

**Дорохов Александр Фёдорович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Дагестан; профессор кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; [dorokhovaf@rambler.ru](mailto:dorokhovaf@rambler.ru).



*Hoang Quang Luong, A. F. Dorokhov*

#### KINEMATICS AND DYNAMICS OF CONROD-FREE MECHANISMS OF TRANSFORMATION OF MOTION

**Abstract.** The modern level of development of the equipment demands an improvement of the internal combustion engines for the purpose of increase of efficiency and economy, decrease in the level of vibration and noise and improvement of mass-dimensional indicators. In this connection, a perspective direction of improvement of the indicators of internal combustion engines is a search of the new decisions of their construction. Conrod-free mechanism allows structurally simple to implement a two-sided operational process with small dimensions and high-speed engines. The kinematic scheme of the conrod-free mechanism of transformation of the movement is provided. According to theoretical study, there were determined the principles of action and the constructive scheme of the conrod-free mechanism of the motion transformation, it helped reveal their particular kinematic and dynamic characteristics of the conrod-free engine. The equations of the piston movement, the equations of velocity and acceleration of the mechanism are considered. The characteristics of the mechanism dynamics, the force of the mechanism inertia, the force of the moving mass inertia, centrifugal



force of the crank inertia, the forces of gas pressure and the total forces operating in a mechanism are also examined. On the basis of the results of the research of dynamics, the method of balancing the forces of inertia and their moments is defined. The results of the research allow to define a complex interrelation of the processes occurring in the mechanisms of the conrod-free engines, and the features of the thermodynamic cycle of the conrod-free engine.

**Key words:** kinematics, dynamics, conrod-free mechanism, transformation of motion, reciprocating motion, rotatory motion, slider, directing, piston, speed, acceleration, force, moment, balancing.

#### REFERENCES

1. Klement'ev V. V. *Kinematika i dinamika netraditsionnoi beskrivoshipnoi porshnevoi teplovoi mashiny: dis...kand. tekhn. nauk* [Kinematics and dynamics of non-conventional crankless piston heating machine. Dis. cand. tech. sci.]. Chelyabinsk, 2002. 164 p.
2. Balandin S. S. *Besshatunnye dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Conrod-free internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 175 p.
3. <http://altzero.ru/articles/033.php>.
4. Mishchenko N. I. *Netraditsionnye malorazmernye dvigateli vnutrennego sgoraniia. V 2 t. T. 1. Teoriia, razrabotka i ispytanie netraditsionnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Specific small-size internal combustion engines. In 2 vol. Vol. 1. Theory, development and testing of specific internal combustion engines]. Donetsk, Lebed' Publ., 1998. 228 p.
5. Zaikin O. A. *Sovershenstvovanie privodov transportno-tekhnologicheskikh mashin c ispol'zovaniem zubchatogo besshatunnogo differentsiala: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of the drivers of transport technological machines using rack-type conrod-free differential. Dis. cand. tech. sci.]. Volgograd, 2014. 173 p.
6. Mishchenko N. I., Khimchenko A. V. *Osobennosti kinematiki odnotsilindrovogo dvigatel'ia s dvumia shatunami, soedinennymi s dvumia kolenchatymi valami* [The specific characteristics of kinematics of single-stroke engine with two rods connected with two crankshafts]. *Otraslevoe mashinostroenie. Trudy Tavricheskoi gosudarstvennoi agrotekhnicheskoi akademii*, 1998, vol. 5, iss. 2, pp. 22–25.
7. Mishchenko N. I. *Krivoshipno-kulisnyi mekhanizm dvukhtaktnogo besshatunnogo dvigatel'ia maloi moshchnosti* [Crank-rocker mechanism of two-stroke conrod-free engine of small capacity]. *Otraslevoe mashinostroenie. Trudy Tavricheskoi gosudarstvennoi agrotekhnicheskoi akademii*, 1998, vol. 6, iss. 2, pp. 33–35.
8. Mishchenko N. I. *Perspektivnaia konstruktsiia besshatunnogo dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia* [Perspective construction of conrod-free internal combustion engine]. *Avtoshliakhovik Ukraini*, 1998, no. 2, pp. 16–17.

The article submitted to the editors 08.07.2015

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Hoang Quang Lyong** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering Equipment"; [hquangluong@gmail.com](mailto:hquangluong@gmail.com).

**Dorokhov Alexander Fedorovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Honor Scientist of the Republic of Dagestan; Professor of the Department "Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering Equipment"; [dorokhovaf@rambler.ru](mailto:dorokhovaf@rambler.ru).

