

ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РОТОРНОЙ СВОБОДНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ

И. В. Иванова¹, Ю. В. Родионов^{1,2}, Н. В. Воронин²,
А. И. Скоморохова³, А. Н. Пахомов⁴, А. Е. Ломовских⁵

*Кафедра инженерных дисциплин (1),
Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», Тамбов, Россия;
кафедры: «Механика и инженерная графика» (2), «Компьютерно-
интегрированные системы в машиностроении» (3);
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (4),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра автомобильной подготовки (5), ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; орбитальный двигатель; проектный расчет; роторно-поршневой двигатель.

Аннотация: Рассмотрены преимущества роторно-поршневых двигателей внутреннего сгорания в сравнении с поршневыми. Отмечены основные недостатки двигателя Ванкеля и орбитального двигателя Сейрича. Дано описание конструкции роторного свободно-лопастного двигателя внутреннего сгорания, разработанного на основе двигателей Ванкеля и Сейрича. Показана модель конструкции лопасти с управлением посредством самосинхронизации при помощи динамического гасителя, размещенного внутри лопасти на гибком элементе. Представлено решение системы самосинхронизации лопасти с динамическим гасителем. Рассмотрена возможность использования изделий из полимерных материалов в орбитальном двигателе, в том числе с использованием технологии магнито-термического поверхностного упрочнения.

Введение

В настоящее время в качестве силовых установок большинства машин применяются поршневые двигатели внутреннего сгорания. В основе их работы заложен принцип преобразования возвратно-поступательного движения, осуществляемого поршнем (или поршнями), во вращательное движение, которое совершает коленчатый вал, посредством кривошипно-шатунного механизма. Однако по сравнению с роторно-поршневыми двигателями (РПД) они имеют низкий КПД. Роторно-поршневые двигатели не получили повсеместного распространения, хотя обладают некоторыми преимуществами, представляющими практический интерес:

- достаточно компактны;
- имеют сравнительно небольшой вес;
- большая мощность и хорошая уравновешенность [1].

В первой конструкции РПД, предложенной Ванкелем [2], ротор-поршень совершает планетарное движение, но при своем достаточно простом исполнении расходует завышенное количество топлива ввиду растянутой формы камеры.

Ротор снабжен уплотнительными полосами, которые испытывают трение со стороны боковых внутренних тороидальных стенок, что приводит к серьезным вибрациям уплотнительных полос и высокому износу из-за постоянного изменения контура поверхности данных стенок. Тороидальные поверхности ведут к неравномерному разогреву с одновременным изменением положения камеры сгорания относительно корпуса с возникновением температурных напряжений, что приводит к их искривлению. Указанные недостатки стали причиной, по которой двигатель Ванкеля не получил широкого распространения. В серийном производстве он используется только крупнейшей японской корпорацией Toyota Motor Corporation на автомобилях марки «Мазда».

Конструкцию орбитального двигателя с круговым параллельным движением ротора-поршня предложил австралийский инженер Сейрич [3]. Его отличие от двигателя Ванкеля заключается в использовании формы ротора, вращающегося вокруг внутренней части двигателя. Недостаток РПД Сейрича состоит в сложности обеспечения уплотнения лопастей в роторе. Это обусловлено движением лопастей, создающих рабочие объемы между ротором и статором. В то же время концами этих лопастей относительно ротора совершается движение, аналогичное ползуну в синусном механизме. Данный принцип сходен с режимами работы ЖВН [4, 5]. В итоге, двигатель Сейрича мог выдержать частоту вращения не более 4000 об/мин.

Устранить данный недостаток можно путем обеспечения возвратно-вращательного движения лопастей относительно ротора или по аналогии с кулисным механизмом относительно статора [6]. Это приводит к усложнению уплотнения лопастей в статоре, но, в то же время, сильно упрощается в роторе, с облегчением передачи движения от ротора к лопастям.

Цель работы – исследование параметров работы и конструктивных характеристик двигателя внутреннего сгорания, представленного роторной свободнолопастной машиной.

Методика и методы

Разработкой различных методик расчета параметров работы двигателей внутреннего сгорания занимались многие современные ученые. Например, в статье [7] проведен анализ подходов к исследованию потерь на трение. Авторы работы [8] описывают вибродиагностику авиационного поршневого двигателя для оценки технического состояния. Но при этом достаточно мало исследований, направленных на разработку и совершенствования методик расчета РПД.

Основные принципы работы роторно-поршневых двигателей и их значимые характеристики изложены в литературе [9 – 11]. Проектированием новых конструкций таких двигателей и повышением эффективности их работы занимаются как зарубежные [12, 13], так и отечественные исследователи [14, 15].

Профессором ФГБОУ ВО «ТГТУ» Ю. В. Воробьевым на основе конструкций РПД Ванкеля и Сейрича разработан орбитальный двигатель с лопастями, монтируемыми в шарнирах, и ротором-поршнем, совершающим круговое параллельное движение [16]. Данный двигатель также получил название роторной свободнолопастной машины.

Результаты и их обсуждение

При проектировании роторной свободно-лопастной машины важно выявление зависимости объемов утечек воздуха от величины образующегося зазора в процессе нагнетания при пуске, а также исследование конструктивных параметров движущейся лопасти. Для этого в первую очередь необходимо определить, как изменится давление в замкнутом объеме при политропическом сжатии газобразного тела. В случае, когда наличие утечек не рассматривается, это можно сделать по уравнению Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{a}{\vartheta^2}\right)(\vartheta - b) = RT, \quad (1)$$

где P – величина давления газа, Н/м²; ϑ – величина удельного объема газа, м³/кг; $R = 8314/M$ – газовая константа, Дж/(кг·град), M – молекулярный вес, кг/моль; T – температура, К; a, b – константы газа (из справочника).

Фактическое давление сжатия с учетом утечек определяется, зная скорость истечения газа через зазор:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + \omega_1^2, \quad (2)$$

где v_1 – первоначальная скорость (ее величиной в начале расчета пренебрегаем, $\omega_1 \rightarrow 0$), м/с; k – показатель адиабаты; P_1, P_2 – соответственно начальное и конечное давления при адиабатном сжатии, атм.

Для определения величины потерь объема газа воспользуемся следующим выражением:

$$V = \omega f, \quad (3)$$

где $f = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь зазора в поперечном сечении, м².

Потери объема газа при различных оборотах кривошипа определяются как

$$W = Vt, \quad (4)$$

где t – время постоянного давления, с.

Относительные потери давления вычисляются по формуле

$$E = \frac{P_{\text{нач}} - P_{\text{пот}}}{P_{\text{нач}}} 100 \%, \quad (5)$$

где $P_{\text{нач}}, P_{\text{пот}}$ – давление в камере соответственно без учета и с учетом утечек, атм.

Графические зависимости, полученные в соответствии с приведенными формулами, показаны на рис. 1, 2.

Рассмотрим управление движением лопасти роторной свободно-лопастной машины посредством самосинхронизации (рис. 3).

Жесткость пружины гасителя и его масса определяются путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + \varepsilon_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = f_0 \sin \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + \varepsilon_2 \dot{x}_2 + c_2 (x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

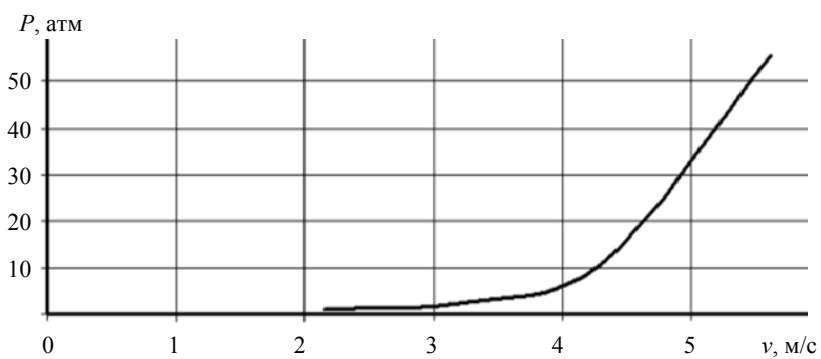


Рис. 1. График зависимости скорости истечения газа через зазор от давления

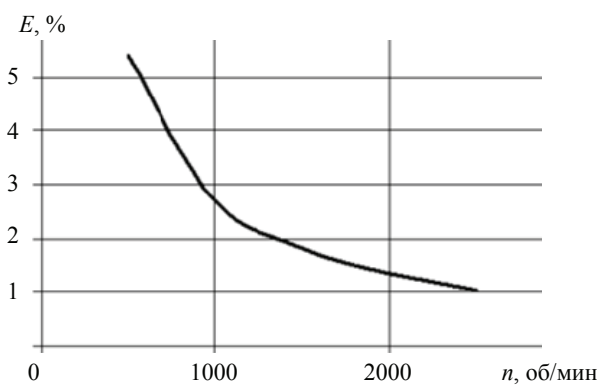


Рис. 2. График зависимости потерь давления в зависимости от числа оборотов кривошипа

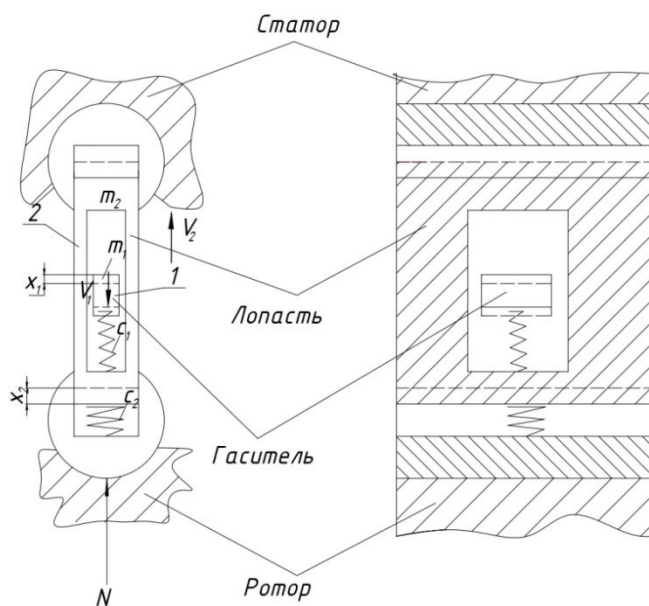


Рис. 3. Пластина ротора (лопасти) с системой самосинхронизации и динамическим гасителем, закрепленным при помощи гибкого элемента внутри нее

где c_1, c_2 – жесткости пружин пластины ротора и гибкого элемента динамического гасителя, Н/м; m_1, m_2 – массы соответственно пластины ротора и динамического гасителя, кг; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты трения соответственно пластины ротора и динамического гасителя; x_1, x_2 – абсолютные коэффициенты, отсчитываемые от статического положения системы, находящейся в равновесии, м; $f_0 \sin \omega t$ – периодическая сила, под действием которой находится пластина ротора, Н.

Решение данной системы будет иметь следующий вид (вынужденные колебания):

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t; \\ x_2 = A_2 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t. \end{cases} \quad (7)$$

Период колебаний лопасти опережает период колебаний гасителя на 180° (рис. 4).

До удара тело массой m_1 (в данном случае оно представляет собой лопасть) движется навстречу телу массой m_2 (соответственно, гаситель) со скоростью V_1 . При этом тело 2 под действием силы инерции движется по направлению к телу 1 со скоростью V_2 (см. рис. 3).

Начало отсчета перемещений ведется от исходного положения гасителя и лопасти. Когда тела приводятся в движение, происходит изменение длины пружины на величину, равную l , м, то есть

$$a = l + x_2 - x_1. \quad (8)$$

Величина сжатия пружины

$$\alpha = a - l = x_2 - x_1. \quad (9)$$

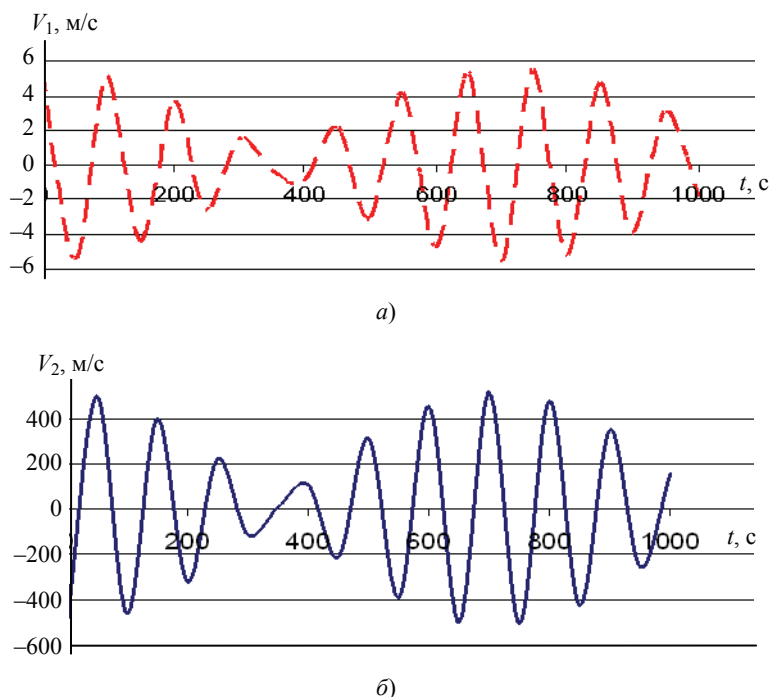


Рис. 4. Графики зависимости изменения скоростей лопасти (а) и гасителя (б), закрепленного при помощи гибкого элемента внутри лопасти, от времени при максимальном числе оборотов

Для данного случая сила сопротивления пропорциональна сжатию, а также находится в зависимости от величины смещения

$$N = f(\alpha) = c\alpha, \quad (10)$$

где c – жесткость пружины, Н/м.

Под действием силы сжатия пружины находятся как лопасть, так и гаситель. Эта сила сообщает им ускорение, вследствие чего скорость тел изменится. После удара скорости лопасти и гасителя будут равны соответственно

$$V_1 = x_1' = \frac{dx_1}{dt}; \quad (11)$$

$$V_2 = x_2' = \frac{dx_2}{dt}. \quad (12)$$

Тогда ускорения лопасти и гасителя можно обозначить как:

$$w_1 = \frac{dV_1}{dt} = \frac{d^2x_1}{dt^2}; \quad w_2 = \frac{dV_2}{dt} = \frac{d^2x_2}{dt^2}. \quad (13)$$

За положительное направление сил, скоростей и ускорений принимаем направление первоначальных перемещений гасителя. Составим дифференциальные уравнения движения тел во время удара:

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = N; \quad (14)$$

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -N. \quad (15)$$

Для упрощения принимаем, что лопасть до удара была неподвижной ($V_1 = 0$), а гаситель не имел начального сжатия ($\alpha_0 = 0$). Тогда, соединив дифференциальные уравнения движения тел с уравнениями (9) и (10), получим систему, имеющую следующий вид:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = N \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -N \\ N = f(\alpha) \\ x_1 - x_2 = \alpha \end{cases} \quad (16)$$

В результате решения системы получаем:

$$t = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{V_0^2 - 2 \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \int_0^{\alpha} f(\alpha) d\alpha}. \quad (17)$$

Во время удара тела имеют перемещение, равное:

$$X_1 = X_2 = m_1 V_0 t / (m_1 + m_2). \quad (18)$$

Подстановка численных параметров движения лопасти (пластины) привела к следующему результату: отклонения лопасти (пластины) и гасителя от положения равновесия составляют ≈ 1 мм. Полученная величина соответствует «минимально» возможному отклонению тел от положения равновесия (для лопасти (пластины) – 0,1...9 мм; гасителя – 0,1...3 мм). В данной системе динамическая нагрузка снижается за счет действия гибкого элемента.

Конструкция роторной свободно-лопастной машины схематично представлена на рис. 5.

Роторный свободно-лопастной двигатель внутреннего сгорания имеет корпус (на рисунке не указан), который закрыт с обоих торцов торцевыми крышками 1 и 8. Приводной вал 13 проходит через указанный корпус перпендикулярно торцевым крышкам 1 и 8. Поршень 12, помещенный внутрь корпуса эксцентрично поддерживаемый на эксцентричной части 14 приводного вала 13, совершает орбитальное движение без вращения во время работы двигателя. Также в конструкцию данного двигателя входят втулка 2, проставка 3, обойма 4, маслосборный паз 5, подшипниковая опора 6, масляный канал 9, первый 7 и второй 10 дисковые шарниры, множество радиальных и равностоящих лопастей 11, заключенных между торцевыми крышками 1 и 8 и корпусом 12.

Дополнительного усовершенствования конструкции роторной свободно-лопастной машины можно добиться путем изготовления отдельных элементов из термопластичных полимерных материалов, которые уже находят широкое применение во многих отраслях машиностроения. Для повышения их износостойкости

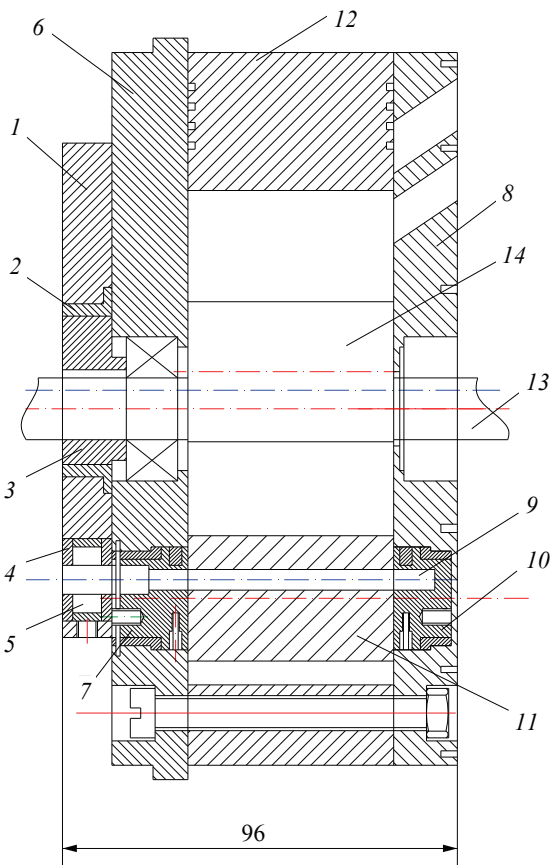


Рис. 5. Схема роторной свободно-лопастной машины

и поверхностной твердости предлагается использовать магнитотермическое поверхностное упрочнение, методика проведения которого подробно представлена в работах [17, 18]. Основная идея технологии заключается в сочетании совместного действия магнитного и термического полей для диффузии частиц металлического порошка внутрь поверхности полимера. Данная технология может быть использована для улучшения эксплуатационных характеристик деталей из любых термопластичных полимеров, а один из ее вариантов позволяет металлизировать детали из терморезистивных полимеров непосредственно в процессе их изготовления. Применение магнитотермического упрочнения также позволит повысить теплостойкость полимерных деталей, что увеличит общую надежность изделия и может снизить металлоемкость производства.

Заключение

Представленная конструкция двигателя внутреннего сгорания, который содержит поршень, совершающий не линейно направленное движение и выполняющий роторное или орбитальное движение, имеет значительные преимущества перед двигателем с линейно направленным поршнем: малый размер, низкий вес и быструю реакцию на изменение мощности. Причиной этого является тот факт, что поршнем в таком двигателе служит ротор, который устанавливается прямо на приводной вал и совершает роторное или орбитальное движение без ускорения и замедления, не зависящее от инерции, в отличие от поршня в обычном ДВС. В двигателе с линейно перемещающимся поршнем камера сгорания находится непосредственно в его центральной части, поэтому движение самого поршня не влияет на динамические характеристики в целом. В случае орбитального движения поршня, который размещается центрально-симметрично относительно оси вала, динамические характеристики по мере вращения ротора могут изменяться.

Преимуществом лопастей, монтируемых в шарнирах, является то, что ускорение их центра тяжести может быть выровнено и, следовательно, передача инерции лопастей к корпусу во время сжатия и ротору во время сгорания позволяет использовать инерцию лопастей как движущую силу и в результате, снизить общий размер двигателя и сложность изготовления конструкции, уменьшить трение, а, следовательно, упростить систему смазки.

Таким образом, предложенная профессором Ю. В. Воробьевым конструкция РПД является перспективной для использования в различных видах техники и требует проведения дальнейших исследований, направленных на внедрение в конструкцию роторной свободно-лопастной машины деталей из термопластичных полимеров, подверженных поверхностному упрочнению.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Разработка метода магнитотермического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения», конкурс «Аспиранты», 2020 г. № договора 20-33-90298/20.

Список литературы

1. Косенок, Б. Б. Кинематический и динамический анализ основного механизма двигателя Ванкеля на основе его векторной модели / Б. Б. Косенок // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та). – 2011. – № 1 (25). – С. 69 – 75.
2. Пат. 2988008А США. Rotary Piston Machines / F. Wankel. – Оpubл. 1961.
3. Пат. 3787150А США. Rotary Motor / T. R. Sarich. – Оpubл. 1974.

4. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57, No. 5-6. – P. 477 – 483. doi: 10.1007/s10556-021-00962-5
5. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2019. – Vol. 55, No. 5-6. – P. 473 – 479. doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Перспективный многоцелевой двигатель внутреннего сгорания / Е. А. Галныкин, Ю. В. Воробьев, А. А. Свиридов, А. Е. Ломовских // *Современные научно-практические решения XXI века : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 21–22 декабря 2016 г., Воронеж. – Воронеж, 2016. – С. 113 – 119.*
7. Обзор различных методов исследования потерь на трение в двигателях внутреннего сгорания / Г. А. Нестеренко, Е. А. Лысенко, И. С. Нестеренко [и др.] // *Междунар. науч.-исслед. журнал*. – 2022. – № 1-1 (115). – С. 52 – 54. doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.009
8. Семенов, П. В. Особенности вибродиагностики при контроле технического состояния авиационного поршневого двигателя (обзор) / П. В. Семенов, А. Ю. Севостьянов // *Вестн. Уфимского гос. авиационного техн. ун-та*. – 2021. – Т. 25, № 3 (93). – С. 72 – 79. doi: 10.54708/19926502_2021_2539372
9. Автомобильные двигатели / В. М. Архангельский, М. М. Вихерт, А. Н. Воинов [и др.] ; под ред. М. С. Ховаха. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 591 с.
10. Окорочков, В. В. Актуальность и направления развития роторно-поршневой тематики / В. В. Окорочков, В. М. Окорочкова, В. В. Шафранов // *Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та)*. – 2014. – № 5-3 (47). – С. 82 – 91.
11. Научно-технические проблемы создания и производства роторно-поршневых двигателей для БПЛА за рубежом / А. Н. Костюченков, В. П. Минин, С. А. Клементьев, А. В. Федин // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. – 2019. – № 3 (28). – С. 143 – 156. doi: 10.35264/1996-2274-2019-3-143-156
12. Preliminary Explorations of the Performance of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine / J. Gao, G. Tian, P. Jenner [et al.] // *Energy*. – 2020. – Vol. 190. – P. 116402. doi: 10.1016/j.energy.2019.116402
13. Intake Characteristics and Pumping Loss in the Intake Stroke of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine / J. Gao, G. Tian, P. Jenner, M. Burgess // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 261. – P. 121180. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121180
14. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчета / А. Н. Костюченков, А. А. Зеленцов, П. В. Семенов, В. П. Минин // *Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та)*. – 2014. – № 5-2 (47). – С. 173 – 181.
15. Окорочков, В. В. Повышение эффективности двигателей роторно-поршневой схемы реализацией дизельного цикла / В. В. Окорочков, В. М. Окорочкова, А. И. Раводин // *Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 243 – 251. doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251
16. Пат. 2285126 РФ, МПК F01C 1/39, F02B 55/02. Орбитальный двигатель внутреннего сгорания / Ю. В. Воробьев, В. Б. Тетерюков. – № 2004130817/06 ; заявл. 22.10.2004 ; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. – 26 с.
17. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials / Y. V. Rodionov, D. V. Nikitin, N. V. Voronin, I. S. Filatov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57, No 7-8. – P. 595 – 600. doi: 10.1007/s10556-021-00981-2

18. Определение сил воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнитотермического поверхностного армирования изделий из термопластичных полимеров / Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 486 – 496. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.486-496

Elements of Calculating the Internal Combustion Engine Using the Example of a Rotary Free-Blade Machine

I. V. Ivanova¹, Yu. V. Rodionov^{1, 2}, N. V. Voronin²,
A. I. Skomorokhova³, A. N. Pakhomov⁴, A. E. Lomovskikh⁵

*Department of Engineering Disciplines (1),
Tambov Branch of Michurinsk State Agrarian University, Tambov, Russia;
Department of Mechanics and Engineering Graphics (2),
Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (3);
Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (4),
TSTU, Tambov, Russia;
Department of Automotive Training (5), Air Force Academy
named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia*

Keywords: internal combustion engine; orbital engine; design calculation; rotary piston engine.

Abstract: The advantages of rotary-piston internal combustion engines in comparison with piston ones are considered. The main shortcomings of the Wankel engine and the Seyrich orbital engine are noted. A description of the design of a rotary free-blade internal combustion engine developed on the basis of Wankel and Seyrich engines is given. A model of the blade design with control is shown by means of self-synchronization using a dynamic damper placed inside the blade on a flexible element. The solution of the blade self-synchronization system with a dynamic damper is presented. The possibility of using products made of polymeric materials in an orbital engine, including using the technology of magneto-thermal surface hardening, is considered.

References

1. Kosenok B.B. [Kinematic and dynamic analysis of the main mechanism of the Wankel engine based on its vector model], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2011, no. 1 (25), pp. 69-75. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Wankel F. Rotary Piston Machines, US, 1961, Pat. 2988008A.
3. Sarich T.R. Rotary Motor, US, 1974, Pat. 3787150A.
4. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Mahmood M.A., Mikheev N.V. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, vol. 57, no. 5-6, pp. 477-483, doi: 10.1007/s10556-021-00962-5
5. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 5-6, pp. 473-479, doi: 10.1007/s10556-019-00648-z

6. Galnykin Ye.A., Vorob'yev Yu.V., Sviridov A.A., Lomovskikh A.Ye. *Sovremennyye nauchno-prakticheskiye resheniya XXI veka* [Modern scientific and practical solutions of the XXI century], of the International Scientific and Practical Conference, 21-22 December, 2016, Voronezh, 2016, pp. 113-119. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Nesterenko G.A., Lysenko Ye.A., Nesterenko I.S., Shukh G.V., Morozova A.R. [Review of various methods for studying friction losses in internal combustion engines], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2022, no. 1-1 (115), pp. 52-54, doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.009 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Semenov P.V., Sevost'yanov A.Yu. [Features of vibration diagnostics in monitoring the technical condition of an aircraft piston engine (review)], *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2021, vol. 25, no. 3 (93), pp. 72-79, doi: 10.54708/19926502_2021_2539372 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Arkhangel'skiy V.M., Vikhert M.M., Voinov A.N. [et al.], Khovakh M.S. [Ed.] *Avtomobil'nyye dvigateli* [Automobile engines], Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 591 p. (In Russ.)
10. Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Shafranov V.V. [Relevance and directions of development of rotary-piston topics], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2014, no. 5-3 (47), pp. 82-91. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Kostyuchenkov A.N., Minin V.P., Klement'yev S.A., Fedin A.V. [Scientific and technical problems of design and production of rotary piston engines for UAVs abroad], *Innovatika i ekspertiza: nauchnyye trudy* [Innovation and expertise: scientific papers], 2019, no. 3 (28), pp. 143-156, doi: 10.35264/1996-2274-2019-3-143-156 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Gao J., Tian G., Jenner P., Burgess M., Emhardt S. Preliminary Explorations of the Performance of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine, *Energy*, 2020, vol. 190, p. 116402, doi: 10.1016/j.energy.2019.116402
13. Gao J., Tian G., Jenner P., Burgess M. Intake Characteristics and Pumping Loss in the Intake Stroke of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine, *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 261, p. 121180, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121180
14. Kostyuchenkov A.N., Zelentsov A.A., Semenov P.V., Minin V.P. [Development of a single-section rotary-piston engine-demonstrator based on modern complex calculation methods], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2014, no. 5-2 (47), pp. 173-181. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Ravodin A.I. [Improving the efficiency of engines of a rotary piston scheme by implementing a diesel cycle], *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* [Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering], 2016, vol. 15, no. 4, pp. 243-251, doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Vorob'yev Yu.V., Teteryukov V.B. *Orbital'nyy dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Orbital internal combustion engine], Russian Federation, 2006, Pat. 2285126. (In Russ.)

17. Rodionov Y.V., Nikitin D.V., Voronin N.V., Filatov I.S. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, vol. 57, no. 7-8, pp. 595-600, doi: 10.1007/s10556-021-00981-2

18. Voronin N.V., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Filatov I.S. [Determination of forces acting on a ferromagnetic particle in the process of magnetothermal surface reinforcement of articles made of thermoplastic polymers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 486-496, doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.486-496 (In Russ., abstract in Eng.)

Elemente der Berechnung des Verbrennungsmotors am Beispiel der rotierenden Freischaufel-Maschine

Zusammenfassung: Es sind die Vorteile von Kreiskolben-Verbrennungsmotoren gegenüber Kolben-Verbrennungsmotoren betrachtet. Die Hauptmängel des Wankelmotors und des Seyrich-Orbitalmotors sind markiert. Beschrieben ist der Aufbau eines auf Basis von Wankel- und Seyrich-Motoren entwickelten Rotations-Freischaufel-Verbrennungsmotors. Es ist ein Modell der Schaufelkonstruktion mit Steuerung mittels Selbstsynchronisation unter Verwendung eines dynamischen Dämpfers gezeigt, der innerhalb der Schaufel auf einem flexiblen Element platziert ist. Die Lösung des Selbstsynchronisationssystems der Schaufel mit einem dynamischen Dämpfer ist vorgestellt. Die Möglichkeit der Verwendung von Produkten aus Polymermaterialien in einem Orbitalmotor, einschließlich der Verwendung der Technologie der magnetisch-thermischen Oberflächenhärtung, ist in Betracht gezogen.

Éléments du calcul du moteur à combustion interne à l'exemple de la machine à palettes libres rotatives

Résumé: Sont examinés les avantages des moteurs à combustion interne à piston rotatif par rapport aux moteurs à piston. Sont notés les principaux inconvénients du moteur Wankel et du moteur orbital Seyrich. Est donnée une description de la conception d'un moteur à combustion interne à rotor libre élaboré à la base des moteurs Wankel et Seyrich. Est montré le modèle de la structure de la pale avec commande par auto-synchronisation au moyen d'un amortisseur dynamique placé à l'intérieur de la pale sur un élément flexible. Est présentée la solution du système d'auto-synchronisation de la lame avec un amortisseur dynamique. Est envisagée la possibilité d'utiliser des produits en matériaux polymères dans le moteur orbital, y compris en utilisant la technologie de durcissement de la surface magnéto-thermique.

Авторы: *Иванова Ирина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерных дисциплин, Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерных дисциплин, Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»; профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Воронин Николай Владимирович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Скоморохова Анастасия Игоревна* – магистрант; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Ломовских Александр Егорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильной подготовки, ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия.