

Анализ характеристик теплового двигателя внешнего сгорания методом компьютерного моделирования

к.т.н. доц. Потапов С.И., к.т.н. доц. Никишкин С.И., к.т.н. проф. Пискарев М.Ю.
Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева
auto@dksta.ru 8(49232)32062

Аннотация. Разработана математическая модель, которая использована при построении компьютерной модели теплового двигателя внешнего сгорания. На основе компьютерного моделирования установлены основные закономерности функционирования теплового двигателя, выполнен анализ влияния изменения параметров на его характеристики и разработан вариант конструкции двигателя.

Ключевые слова: тепловой двигатель внешнего сгорания, математическое моделирование, компьютерное моделирование

Тепловые двигатели внешнего сгорания являются альтернативным вариантом двигателей внутреннего сгорания (ДВС). К настоящему времени предложено большое разнообразие конструкций двигателей внешнего сгорания, в [1] их предложено обозначать общим термином – двигатели Стирлинга (ДС). ДС широко применяются в различных стационарных объектах, в космосе, на подводных лодках. Они также используются в выпускных трактах тепловых станций и мощных ДВС с целью утилизации тепловой энергии. В последние годы ДС получили применение в автомобилях. Это обусловлено рядом преимуществ этих двигателей: возможность работы от любого внешнего источника тепловой энергии, закрытый рабочий цикл, экологичность, бесшумность и большой ресурс работы

Объектом анализа данной работы является одна из перспективных схем двигателя: роторно-поршневой двигатель Стирлинга (РПДС) с полым цилиндрическим поршнем (рисунок 1). В роторных двигателях отсутствует механизм преобразования поступательного движения поршня во вращательное движение выходного вала, что упрощает конструкцию и снижает потери энергии в нем.

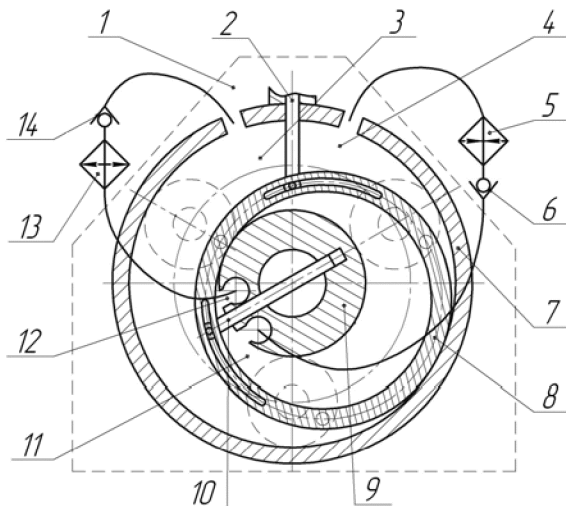


Рисунок 1 – Схема РПДС

РПДС включает объемную роторную машину 1, соединенную с нагревателем 5 и холодильником 13, перед которыми установлены обратные клапаны 6 и 14. Вращающийся цилиндрический поршень 8 совместно с шиберами 2 и 10, движущимися в радиальных направляющих, делит пространство между корпусом 7 и статором 9 на четыре полости переменного объема, в которых происходят процессы, образующие рабочий цикл.

Используя рисунок 1, а также рисунок 2, на котором показаны основные фазы работы РПДС, рассмотрим принцип его действия. Газ с высоким давлением и температурой поступает из нагревателя 5 в рабочую полость 4 (НР), где, расширяясь, совершает работу. Затем этот газ передается в полость 3 (НС) посредством «переключения» полостей, происходящего на участке между фазами 8 и 1. Совершенная работа тратится на вытеснение газа из полости

3 (НС) через холодильник 13 в полость 12 (ВР), а также на сжатие газа в полости 11 (ВС). Оставшаяся работа является полезной и тратится на преодоление нагрузки на выходном валу (он соосен со статором 9), который соединен через шестерни с тремя опорами поршня 8 (показаны пунктиром). «Переключение» внутренних полостей 11 и 12 происходит аналогично, но между фазами 1 и 2 (то есть со сдвигом по фазе по отношению к наружным полостям).

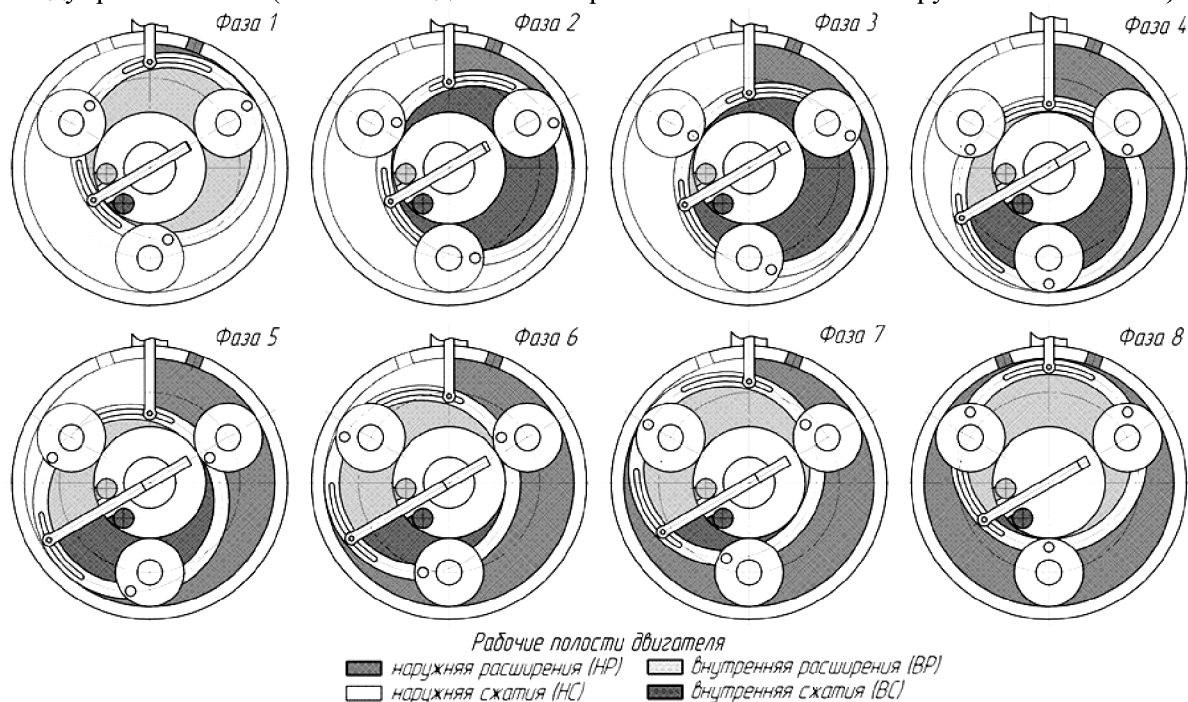


Рисунок 2 – Основные фазы работы РПДС

Анализ принципа действия показывает, что РПДС является сложной технической системой с переменной структурой (переключения полостей, срабатывания клапанов), в которой одновременно протекают взаимосвязанные процессы различной физической природы: механические, тепловые и термогазодинамические. Классические алгебраические методы анализа его характеристик тут не приемлемы, в этом случае в [1, 2] рекомендуется метод непосредственного моделирования рабочих процессов на ЭВМ.

В настоящее время этот метод получил название компьютерного моделирования (КМ), он является «третьей» методологией получения новой информации об объекте анализа, наряду с теорией и практикой [3 - 5]. КМ включает следующие основные этапы: разработка математического, информационного и программного обеспечения; вычислительные эксперименты с целью исследования сущности физических процессов в объекте и определения его рациональных (оптимальных) параметров; проектирование, конструирование и испытания объекта. По результатам испытаний возможно повторение цикла работ, начиная с любого этапа. В соответствии с этой методологией и выполнялись исследования, результаты которых изложены в данной работе.

Разработка математического описания для компьютерного моделирования функционирования двигателя также велась поэтапно. На начальном этапе была разработана классическая математическая модель (ММ), в которой газ предполагался идеальным (см., например, [6]), а теплообмен в нагревателе и холодильнике учитывался в форме вынужденной конвекции (см. [7], С. 98-102). Однако практическая проверка этой модели показала, что решение задачи не всегда устойчиво при малых объемах полостей (а они при переключении полостей близки к нулю). Это обусловлено соизмеримостью массы газа в полости малого объема и массы газа, вытекающей из полости за шаг интегрирования.

Поэтому на втором этапе был разработан упрощенный вариант ММ, который дал хорошее совпадение с классической ММ, но решение было устойчивым и требовало меньших затрат машинного времени. Основное допущение упрощенной ММ заключается в том, что процесс коммутации полостей (объединение или разделение) предполагается происходящим

мгновенно, причем параметры газа в них сразу выравниваются. Это позволяет рассматривать процессы сжатия-расширения газа при его постоянной массе, а при коммутации учитывать изменения объема, массы и энергии в полостях. Таким образом, в упрощенной ММ удалось заменить дифференциальные уравнения законов сохранения массы и энергии в классической ММ типа [6] на более простые термодинамические уравнения, дополняемые учетом влияния теплообмена.

Оба варианта ММ достаточно полно описаны в [8]. Мы ограничимся кратким описанием упрощенной ММ, которая включает подмодели механической, термодинамической и тепловой подсистем.

ММ механической подсистемы базируется на положениях теоретической механики, а также зависимостей для расчета основных характеристик двигателей [9]. Соответствующая расчетная схема показана на рисунке 3.

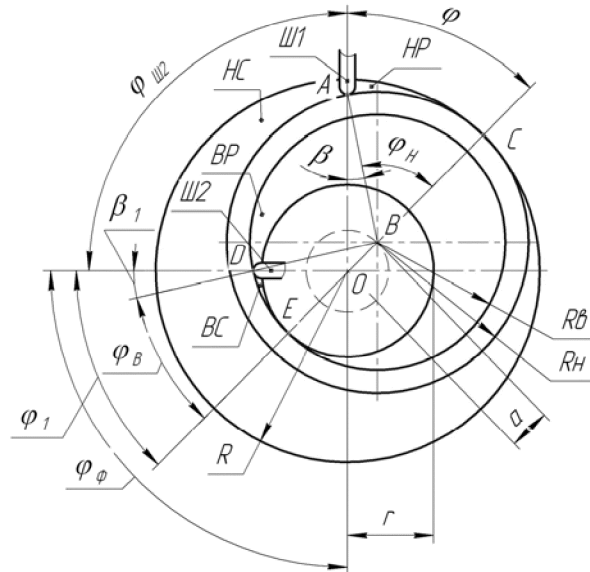


Рисунок 3 – Расчетная схема РПДС

На ее основе получены следующие зависимости.

Относительные объемы наружных полостей расширения и сжатия:

$$\bar{V}_{HP}(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\varphi - \frac{2 \cdot \bar{a} \cdot \bar{R}_H \cdot \sin \varphi}{1 - \bar{R}_H^2} - \frac{0,5 \cdot \bar{a}^2 \cdot \sin 2\varphi}{1 - \bar{R}_H^2} + \frac{0,5 \cdot \bar{a}^2 \cdot \bar{a}_H \cdot \sin^3 \varphi}{1 - \bar{R}_H^2} \right), \quad \bar{V}_{HC} = 1 - \bar{V}_{HP}, \quad (1)$$

где:

$$\bar{V}_{HP}(\varphi) = V_{HP}(\varphi) / V_{HPM}, \quad \bar{V}_{HPM} = \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot \left[1 - (R_H / R)^2 \right]. \quad (2)$$

Относительные объемы внутренних полостей расширения и сжатия:

$$\bar{V}_{BP}(\varphi_1) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\varphi_1 - \frac{2 \cdot \bar{a}_B \cdot \sin \varphi_1}{1 - \bar{r}_B^2} + \frac{0,5 \cdot \bar{a}_B^2 \cdot \sin 2\varphi_1}{1 - \bar{r}_B^2} + \frac{0,5 \cdot \bar{a}_B^3 \cdot \sin^3 \varphi_1}{1 - \bar{r}_B^2} \right), \quad \bar{V}_{BC} = 1 - \bar{V}_{BP}, \quad (3)$$

где:

$$\bar{V}_{BP}(\varphi) = V_{BP}(\varphi) / V_{BPM}, \quad \bar{V}_{BPM} = \pi \cdot R_B^2 \cdot H \cdot \left[1 - (r / R_B)^2 \right], \quad (4)$$

$$\varphi_1 = \varphi + \pi - \varphi_{\Pi 2}, \quad \bar{a}_B = a / R_B, \quad \bar{r}_B = r / R_B, \quad \bar{a} = a / R, \quad \bar{a}_H = a / R_H, \quad \bar{R}_H = R_H / R. \quad (5)$$

Моменты от сил давления, работа цикла, мощность и КПД:

$$M_H = F_H \cdot L_F = a \cdot R_H \cdot H \cdot \Delta p_H \cdot (1 - \cos \varphi_H), \quad \varphi_H = \varphi + \bar{a}_H \cdot \sin \varphi; \quad (6)$$

$$M_B = F_B \cdot L_F = a \cdot R_B \cdot H \cdot \Delta p_B \cdot (1 - \cos \varphi_B), \quad \varphi_B = \varphi + \bar{a}_B \cdot \sin \varphi; \quad (7)$$

$$A_{\Sigma} = \int_0^{2\pi} M_{\Sigma} \cdot d\varphi = \int_0^{2\pi} (M_H - M_B) \cdot d\varphi, \quad A_{CP} = A_{\Sigma} / 2\pi, \quad N = A_{CP} / t_{\Sigma}, \quad (8)$$

$$\eta_t = (T_T - T_X) / T_T, \quad \eta_{ц} = (Q_{TO} - Q_{XO}) / Q_{TO}, \quad \eta_{ц} = A / Q_{TO}. \quad (9)$$

В формулах предусмотрен расчет КПД цикла $\eta_{ц}$ по количеству тепла и по работе цикла для проверки достоверности математического описания.

ММ термодинамической и тепловой подсистемы показана на рисунке 4 в форме двух универсальных расчетных блоков с вербальным описанием алгоритмов выполнения основных расчетных процедур применительно к одной из рабочих полостей РПДС

Блок 1

Расчет процесса сжатия-расширения газа в полости при $m = \text{const}$ с учетом теплообмена

1. Определяем новое значение угла поворота поршня $\varphi_K = \varphi_H + \Delta\varphi$.
2. Определяем объем полости V_K и отношение объемов $\varepsilon = V_K / V_H$.
3. Определяем конечные параметры газа в полости через время Δt
 $p_K = p_H \cdot \varepsilon^k, \quad T_K = T_H \cdot \varepsilon^{k-1}, \quad U_K = (mRT_K) / (k-1)$.
4. Корректируем конечные параметры за счет учета теплообмена
 $T_{CP} = 0.5 \cdot (T_H + T_K), \quad q_{TO} = K_{TO} \cdot F_{TO} \cdot (T_{TO} - T_{CP}), \quad K_{TO} = 0.021 \cdot Re^{0.8},$
 $U_{KK} = U_K + q_{TO} \cdot \Delta t, \quad T_{KK} = [U_{KK} / (k-1)] / (mR), \quad p_{KK} = (mRT_{KK}) / V_K$.
5. Используем скорректированные значения параметров в качестве начальных для следующего шага интегрирования (переход к п. 1).

Блок 2

Расчет процесса объединения и разделения полостей

1. Определяем массы и энергии газа в анализируемых полостях 1 и 2.
 $m_{1(2)} = (p_{1(2)} V_{1(2)}) / (RT_{1(2)}), \quad U_{1(2)} = (m_{1(2)} RT_{1(2)}) / (k-1)$.
2. Определяем результирующие объемы, массы и энергии газа
 $V_{\Sigma} = V_1 \pm V_2, \quad m_{\Sigma} = m_1 \pm m_2, \quad U_{\Sigma} = U_1 \pm U_2$.
3. Определяем температуру и давление в анализируемой полости
 $T_{\Sigma} = [U_{\Sigma} / (k-1)] / (m_{\Sigma} R), \quad p_{\Sigma} = (m_{\Sigma} RT_{\Sigma}) / V_{\Sigma}$.
4. Используем рассчитанные значения параметров в качестве начальных для следующего шага интегрирования.

Рисунок 4 – Алгоритмические модели процессов в полостях РПДС

В блоке 1 первом шаге определяется текущее значение угла поворота поршня. На шаге 2, с использованием зависимостей (1) – (5), рассчитывается текущий объем конкретной полости и вычисляется отношение объемов ε за шаг интегрирования $\Delta\varphi$. На шаге 3 используются зависимости для расчета адиабатического изменения состояния газа. Полученные значения давления и температуры корректируются на шаге 4 за счет учета влияния теплового потока q_{TO} на внутреннюю энергию газа. Формула Михеева М.А. [7] для расчета коэффициента теплоотдачи K_{TO} приведена на рисунке 4 в упрощенном виде. Перед реализацией шага 5 в программе организован внутренний итерационный цикл по согласованию скорректированных термодинамических параметров с потоком тепловой энергии q_{TO} , который зависит от разности температур между теплообменником T_{TO} и средним значением температуры в полости T_{CP} на данном шаге интегрирования.

Блок 2 базируется на законах сохранения массы и энергии при коммутации полостей, которые замыкаются термическим и калорическим уравнением состояния идеального газа. В дополнительных комментариях он не нуждается.

Математическое обеспечение включает как ММ, так и алгоритм для решения системы уравнений, образующих ММ. В основе компьютерной программы лежит алгоритм, представленный на рисунке 5. Он предполагает *последовательное* численное интегрирование уравнений для каждой из полостей (хотя процессы в полостях происходят *одновременно*), начиная с полости сжатия ВС (см. рисунки 1 и 2). В результате выполнения блоков 4 – 6 определяются «новые» параметры газа в полости сжатия ВС. Если они не совпадают с начальным приближением, то выполняется их корректировка в блоке 10, а потом цикл повторяется, начиная с блока 4. Это так называемый «метод установления» по терминологии, применяемой в вычислительной математике. После завершения итераций рассчитываются характеристики двигателя по формулам (6) – (9).

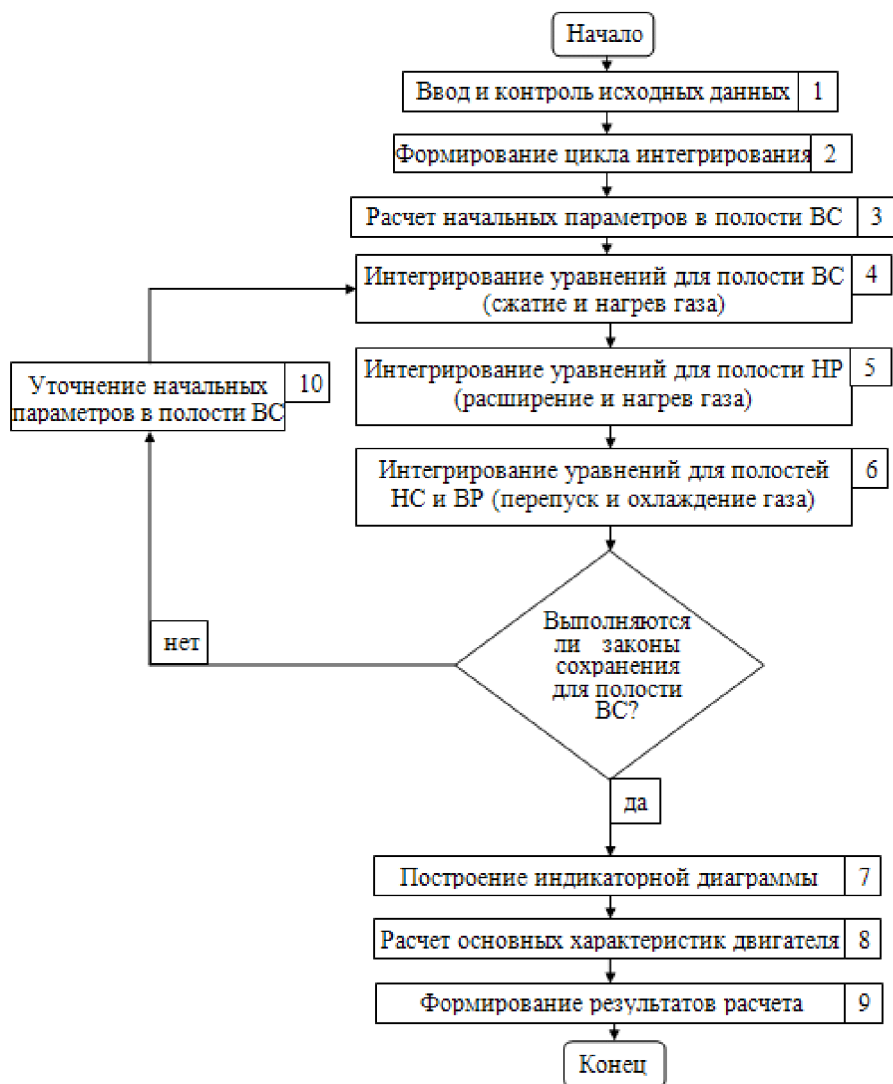


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета РПДС

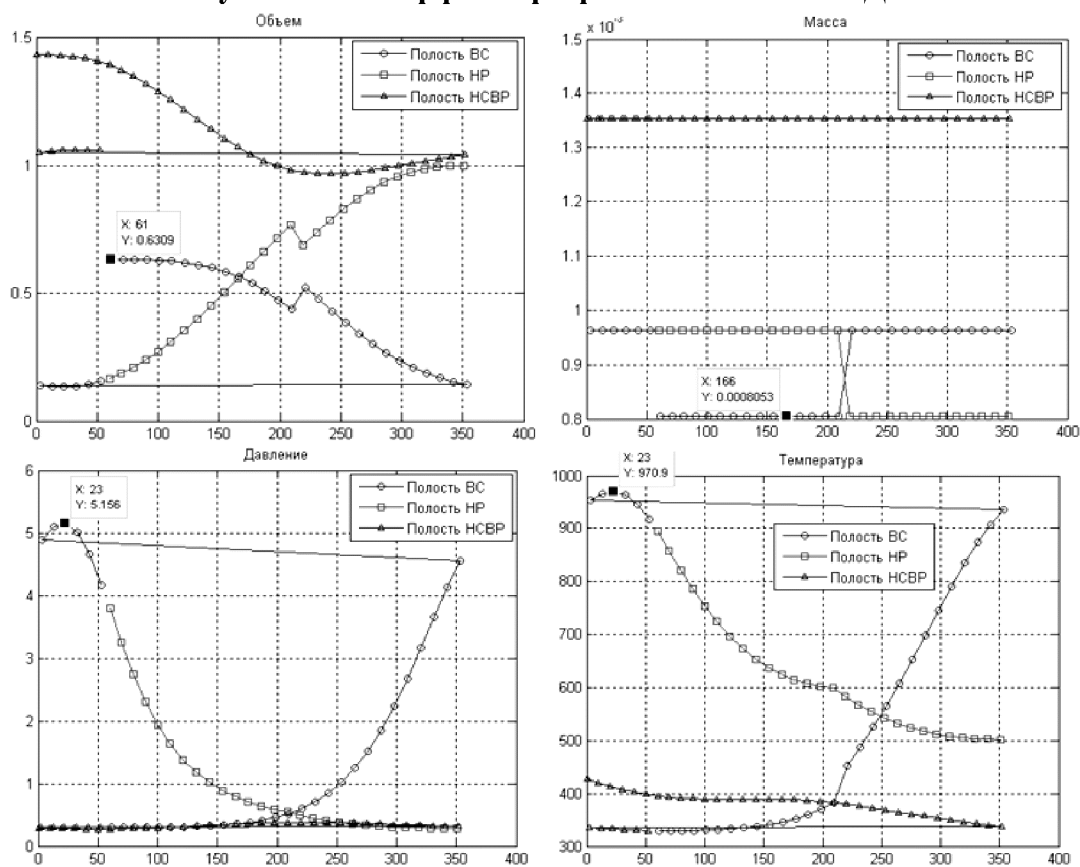
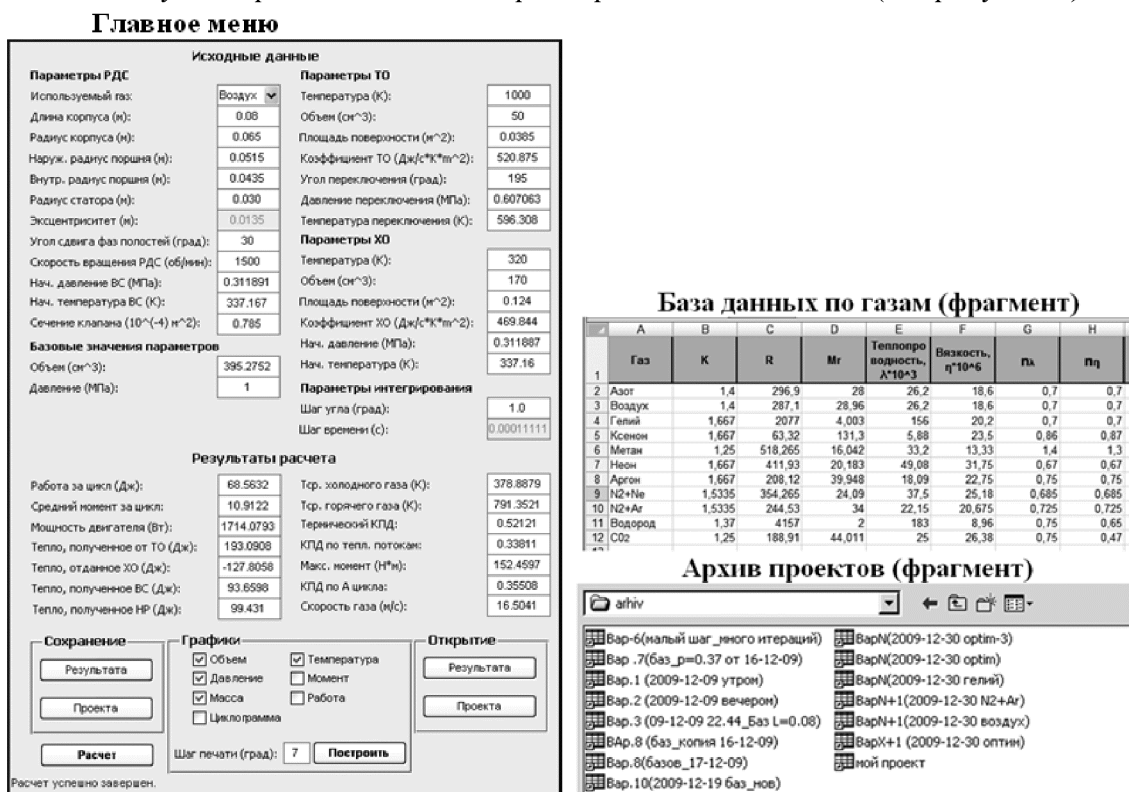
На основе изложенного математического обеспечения в среде МАТЛАБ разработана программа «Анализ РПДС», которая принята в фонд алгоритмов и программ РФ [10]. На рисунке 6 показано ее главное меню и фрагменты информационного обеспечения. В этой программе имеется возможность сохранять результаты в архиве проектов, редактировать их и использовать для формирования новых проектов. Можно использовать в расчетах около 10 рабочих тел (база данных газов может расширяться). По желанию пользователя могут быть выданы таблицы Excel с подробными результатами и до 7 графиков.

На рисунке 7 показаны типовые графики, которые используются в процессе анализа. На них показаны изменения определенного параметра для каждой из рабочих полостей. Графики масс газа в полостях носят контрольный характер, они используются не всегда.

В процессе анализа на ЭВМ сущности физических процессов в РПДС была выявлена возможность более рационального использования энергии, которая поступает в двигатель от теплообменника ТО. Замечено, что температура и давление газа в рабочей полости НР при увеличении ее объема уменьшаются довольно резко. Поэтому рационально на конечном этапе расширения газа в ней прекратить доступ тепловой энергии из ТО, переключив ТО на полость ВС, в которой происходит одновременное сжатие газа для следующего цикла работы. Это позволит накопить больше энергии для нового цикла, а более низкая температура газа в полости НР в конце цикла улучшит условия работы холодильника. Такой переключатель реализован в доработанной конструкции двигателя, что позволило улучшить характеристики РПДС.

Момент переключения ТО с полости НР на полость ВС регулируем. В примере пере-

ключение ТО происходит при 210° , что хорошо видно на графиках: объем ТО «переходит» от НР к ВС, то же происходит с массой газа. Это заметно и на графиках температур. Пользователь может визуализировать значения параметров в любых точках (см. рисунок 7).



На рисунке 8 показаны результаты многовариантного компьютерного анализа влияния

конструктивных и эксплуатационных параметров двигателя на его основные характеристики: мощность N , вращающий момент M и коэффициент полезного действия η .

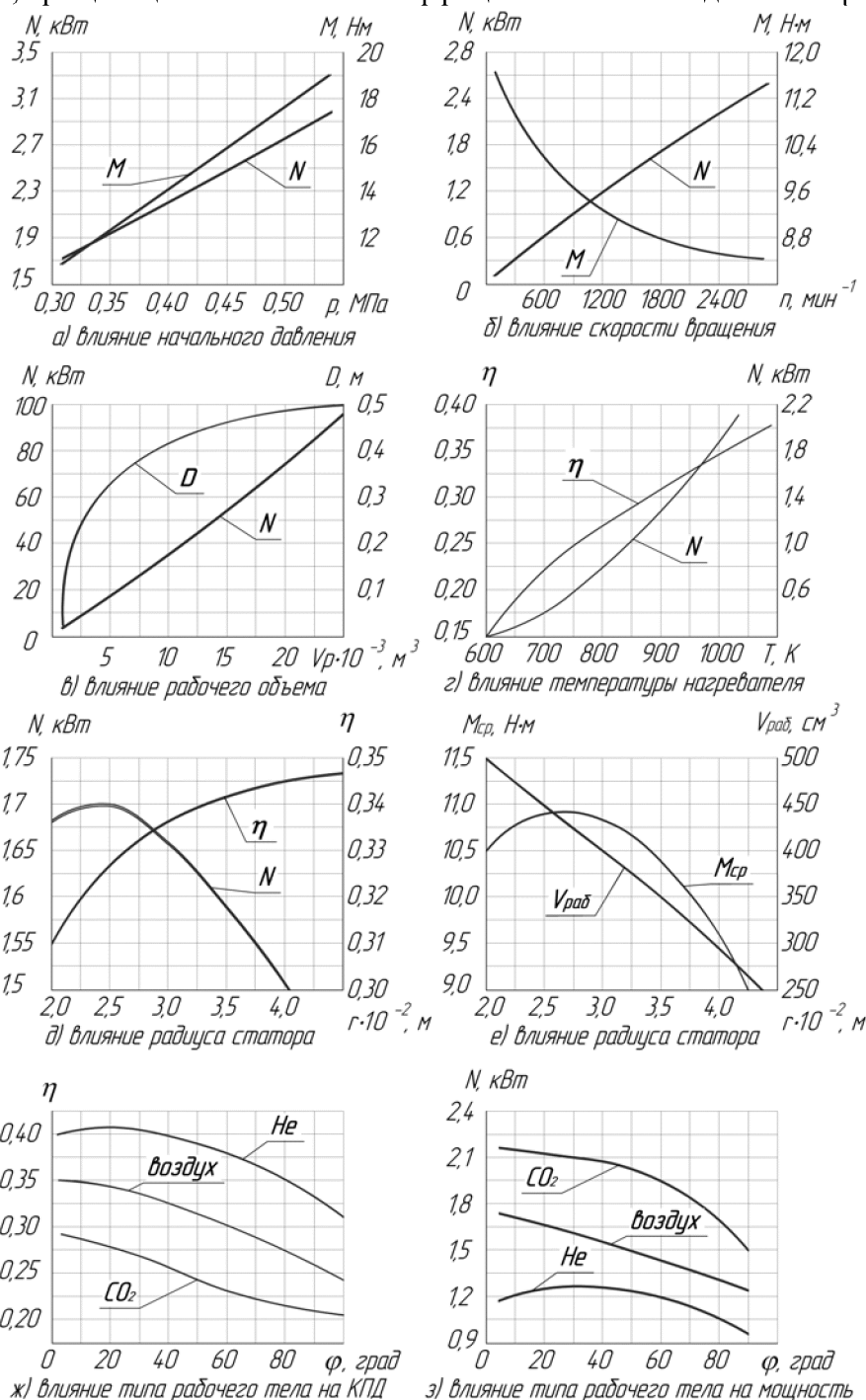


Рисунок 8 – Результаты компьютерного анализа

Из рисунка 8 следует, что мощность можно регулировать изменением начального давления в полости ВС (рисунок 8а) и угла фазового сдвига ϕ (рисунок 8з), двигатель работоспособен при различных температурах нагревателя (рисунок 8г). Исследование влияния геометрических размеров РПДС показало, что имеется возможность их оптимизации (рисунок 8д и 8е), что реализовано в конструкции. Вариации типа рабочего тела показали, что его влияние на характеристики РПДС является противоречивым: КПД выше для одноатомных газов, а мощность – для многоатомных. Это объясняется различием их показателя адиабаты. Перспективно использование смесей газов. Результаты исследований хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работах [1, 2].

По результатам компьютерного моделирования разработан вариант конструкции РПДС (рисунок 9), по чертежам которой изготовлен его опытный образец.

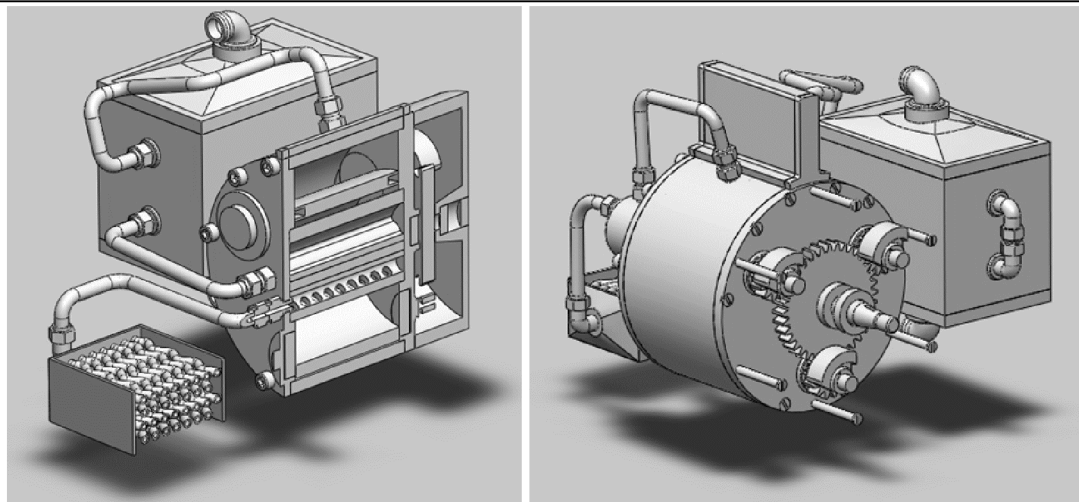


Рисунок 9 – 3D-модель двигателя

Таким образом, в соответствии с методологией компьютерного моделирования разработаны математическая модель РПДС и алгоритм ее решения, изучена сущность физических процессов, происходящих при функционировании двигателя, выполнен многовариантный анализ влияния изменения конструктивных и эксплуатационных параметров РПДС на его характеристики, определены рациональные параметры, которые использованы для разработки конструкции и изготовления РПДС. Готовятся испытания двигателя, по результатам которых будет принято решение о направлении дальнейших исследований, в том числе по доработке конструкции и компьютерной модели.

Литература

1. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Пер. с англ. Б. В. Сутугина и Н. В. Сутугина. - М.: Машиностроение, 1985. - 408 с.
2. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга – М.: Мир, 1986. - 464 с.
3. Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Введение в информатику с позиций математического моделирования /Под ред. А. А. Самарского.– М.: Наука, 1988.- 176 с.
4. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. - М.: Наука, 2003. - 320 с.
5. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 320 с.
6. Математические модели систем пневмоавтоматики./ Ю.Л. Арзуманов, Е.М. Халатов, В.И. Чекмазов – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2009. - 296 с.
7. Михеев М.А. Основы теплопередачи. - Изд. 2-е, заново переработ. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. - 396 с.
8. Никишкин С.И., Потапов С.И. Роторно-поршневой двигатель Стирлинга. Основы теории, инженерный анализ и проектирование. - Ковров: КГТА, 2011 - 208с.
9. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 2002. - 496 с.
10. Волгин М.А., Крылов И.А., Никишкин С.И. Программа «Анализ характеристик роторно-поршневого двигателя Стирлинга» // М.: Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 5(24), 2011, № 17100, с. 17-18

Кинематический и силовой анализ универсального многопоточного дифференциального механизма автоматических коробок передач

Волошко В.В., к.т.н. Галимянов И.Д., Салахов И.И., к.т.н. Мавлеев И.Р.
ФГБОУ ВПО Камская государственная инженерно-экономическая академия (ИНЭКА)
ildarsz@rambler.ru, 8-917-273-98-93

Аннотация. Представлены структурная и кинематическая схемы, а также кон-