

ДВУХБЛОЧНЫЙ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ

А.А. Обозов, д.т.н., проф.
Брянский государственный технический университет
М.А. Старокожев, асп.
Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Приводится описание конструкции и принцип действия двухблочного четырехкамерного роторно-поршневого двигателя. Для расчета рабочих параметров и исследования внутрицилиндровых процессов двигателя разработана его математическая модель. Показаны преимущества предлагаемой конструкции в сравнении с известным двигателем Ванкеля.

Конструкция и принцип работы

Конструкция двухблочного четырехкамерного роторно-поршневого двигателя (РПД) была предложена д-ром.физ.-мат. наук, проф. О.Г. Тайцем [1]. Двигатель состоит из следующих основных элементов (рис. 1): двух блоков (всасывания-сжатия и сгорания-выпуска), двух подпружиненных двухсекционных раздвижных роторов и вала. На валу с использованием шпоночного соединения установлены направляющие элементы, по полкам которых могут скользить обе секции ротора. Центр вала смещен относи-

тельно центров блоков на величину эксцентриситета. При вращении роторов в блоках образуются четыре камеры: всасывания, сжатия — в блоке всасывания; сгорания (рабочего хода), выпуска — в блоке сгорания.

Дозированная подача топлива (бензин) в двигатель осуществляется впрыскиванием его через форсунку в камеру всасывания или же во впускной трубопровод, подводящий воздух к камере всасывания.

Количество поступающего в двигатель воздуха регулируется дроссельной заслонкой, установленной во впускном трубопроводе. Управление фазами газораспределения осуществляется непосредственно роторами при их вращении, которые открывают и закрывают впускное и выпускное отверстия, расположенные по окружности статоров. Между блоками установлена перегородка с отверстием, служащим для перепуска сжатой рабочей смеси из камеры сжатия (блок всасывания) в камеру сгорания (блок сгорания).

Принцип действия двигателя (рис. 2) состоит в следующем. Свежая рабочая смесь, поступившая в блок всасывания-сжатия, сжимается ротором, совершающим плоскопараллельное движение. При

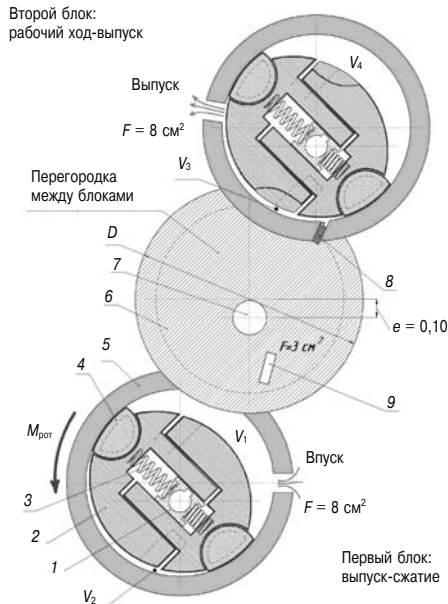


Рис. 1. Основные конструктивные элементы двухблочного четырехкамерного РПД:

1 — направляющий элемент; 2 — секции ротора; 3 — пружина; 4 — уплотнительный элемент (башмак); 5 — статор; 6 — межблочная перегородка; 7 — отверстие выхода вала; 8 — свеча зажигания; 9 — перепускное отверстие; V_i — образующиеся объемы камер

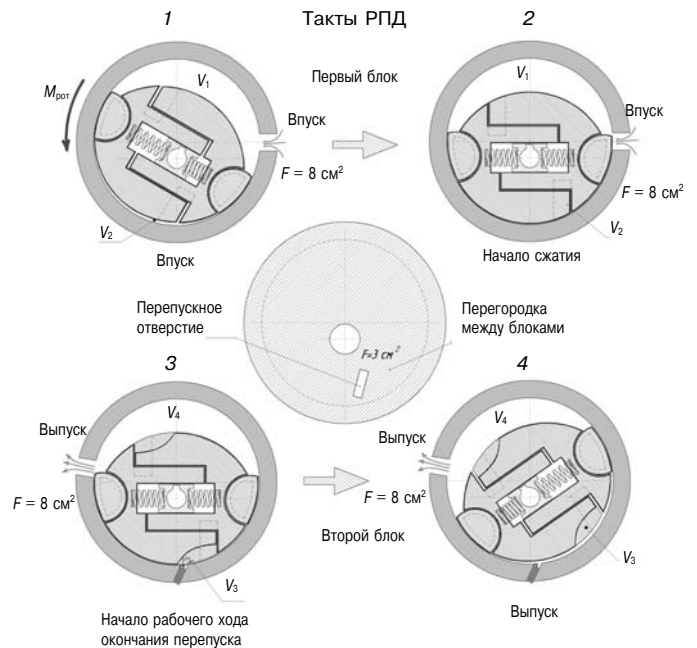


Рис. 2. Схема действия двухблочного четырехкамерного РПД

повороте роторов в положение $\varphi = -30$ (330) град ПВ (30 град ПВ, не доходя до их горизонтального положения) начинается перепуск рабочей смеси (горизонтальному положению роторов соответствует минимальный объем камер при углах поворота вала $\varphi = 0$ или 360 град ПВ). Сжатая рабочая смесь через отверстие в межблочной перегородке перепускается из камеры сжатия (блока всасывания) в камеру сгорания (блока сгорания). После окончания перепуска (при $\varphi = 0$ (360) град ПВ) происходит воспламенение рабочей смеси от искры и дальнейшее расширение рабочего тела (совершается рабочий ход). Расширение рабочего тела (РТ) происходит до определенного положения ротора ($\varphi = 180$ (540) град ПВ), при котором объем камеры сгорания становится максимальным. Далее в статоре открывается выпускное отверстие, и происходит процесс сначала свободного выпуска отработавших газов, а затем принудительного выпуска за счет вытеснения газов ротором. В течение одного оборота вала в блоках двигателя совершаются 2 полных рабочих цикла (циклы включают процессы всасывания, сжатия, перепуска, сгорания (рабочего хода) и выпуска).

Основные геометрические размеры РПД:

- > внутренний диаметр камер (статора) $D \approx 20$ см;
- > ширина камер $H \approx 10$ см;
- > эксцентриситет положения вала двигателя $e = 0,1D = 2$ см;
- > площади проходных сечений отверстий впуска $F_{вп} = 8$ см², выпуска $F_{вып} = 8$ см² и перепуска $F_{пер} = 3$ см²;
- > максимальный (минимальный) объем камеры всасывания $V_{вс\ max} = 706$ см³ ($V_{вс\ min} = 5,0$ см³);
- > максимальный (минимальный) объем камеры сгорания $V_{ср\ max} = 773$ см³ ($V_{ср\ min} = 72,5$ см³).

График изменения объемов камер блоков всасывания и сгорания в зависимости от угла ПВ приведен на рис. 3.

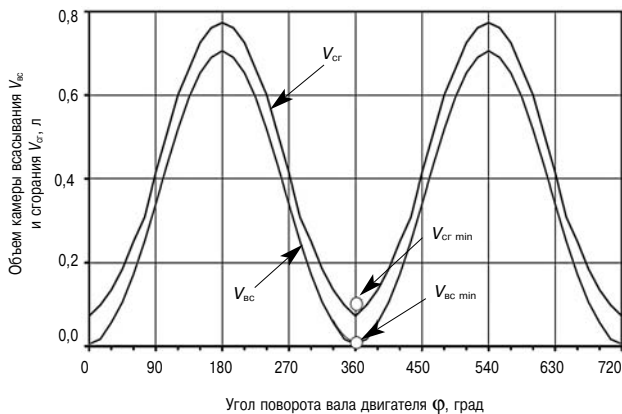


Рис. 3. Изменение объема камер в блоках всасывания и сгорания в зависимости от угла ПВ



Рис. 4. Изменение площадей отверстий впуска, перепуска и выпуска в зависимости от угла ПВ

Минимальные объемы камер всасывания ($V_{вс\ min}$) и сгорания ($V_{ср\ min}$) обеспечиваются конструктивно за счет механической дообработки роторов. Конфигурация данных камер сформирована так, чтобы обеспечить оптимальный процесс перепуска рабочей смеси из камеры сжатия в камеру сгорания.

На рис. 4 показано изменение проходных сечений отверстий впуска, перепуска и выпуска по углу поворота вала двигателя.

В роторах выполнены дополнительные полости, которые при работе двигателя в определенный момент сообщаются друг с другом. При сообщении этих полостей (с помощью отверстия, выполненного в межблочной перегородке) происходит перетекание рабочей смеси из камеры сжатия (блок всасывания) в камеру сгорания (блок сгорания). Конструкция выполнена таким образом, что минимальный объем камеры сжатия значительно меньше минимального объема камеры сгорания (см. рис. 3), то есть $V_{вс\ min} \ll V_{ср\ min}$. К моменту начала перепуска (при $\varphi = -30/330$ град ПВ) давление в камере сжатия приблизительно равно 30 бар, в то время как давление в камере сгорания равно давлению окружающей среды (незначительно превышает уровень в 1 бар). В связи с этим при открытии перепускного отверстия начинается интенсивный процесс перетекания смеси из камеры сжатия в камеру сгорания. В результате перепуска давление в камерах выравнивается, однако течение смеси из камеры сжатия в камеру сгорания продолжается за счет эффекта вытеснения. На данной стадии процесс перепуска сопровождается дополнительным сжатием смеси (продолжает уменьшаться суммарный объем камер). Процесс перепуска завершается, когда объемы камер минимальны (при $\varphi = 0/360$ град ПВ). Длительность фазы перепуска составляет 30 град ПВ. Подача искры в камеру сгорания (при $\varphi = 0/360$ град ПВ) приводит к воспламенению смеси, повышению давления в камере и совершению полезной индикаторной работы. Заключительным тактом работы двигателя является такт выпуска отработавших газов.

Следует отметить, что после завершения процесса перепуска в камере сжатия остается под давлением некоторое количество смеси, которое, если сразу же открыть впускное отверстие, поступит во впускной трубопровод. Произойдет эффект «обратного заброса». Чтобы этого не происходило, открытие впускного отверстия осуществляется с запаздыванием (при $\varphi = 60/420/\text{град ПВ}$). За счет расширения рабочей смеси в камере сжатия (перед началом всасывания) удается получить дополнительную положительную индикаторную работу на данной фазе цикла.

Результаты математического моделирования рабочего процесса

Математическая модель двухблочного РПД строится на основе законов сохранения энергии и массы открытой термодинамической системы, и характеристического уравнения состояния рабочего тела Клапейрона–Менделеева [2]. Закон сохранения энергии для рассматриваемой прикладной задачи представлен в виде системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dU_{вс}}{d\varphi} = \frac{dQ_{w\text{ вс}}}{d\varphi} + \frac{dL_{вс}}{d\varphi} + i_0 \frac{dG_{вс}}{d\varphi} + i_{ec} \frac{dG_{пер}}{d\varphi}; \quad (1)$$

$$\frac{dU_{сг}}{d\varphi} = \frac{dQ_{сг\text{ топл}}}{d\varphi} + \frac{dQ_{w\text{ сг}}}{d\varphi} + \frac{dL_{сг}}{d\varphi} + i_{вс} \frac{dG_{пер}}{d\varphi} + i_{сг} \frac{dG_{вып}}{d\varphi}, \quad (2)$$

где $U_{вс}$, $U_{сг}$ — энергия рабочего тела в камерах блоков всасывания и сгорания; $Q_{w\text{ вс}}$, $Q_{w\text{ сг}}$ — тепло, отводимое в стенки камер блоков всасывания и сгорания; $Q_{сг\text{ топл}}$ — тепло, выделяющиеся при сгорании топлива (в блоке сгорания); $L_{вс}$, $L_{сг}$ — механическая работа, совершаемая рабочим телом в блоках всасывания и сгорания; i_0 , $i_{вс}$, $i_{сг}$ — энтальпии воздуха (смеси) на впуске в камеру всасывания, в камере всасывания при перепуске и энтальпия продуктов сгорания в камере выпуска в процессе выпуска; $G_{вс}$, $G_{сг}$ — масса рабочего тела в камерах блоков всасывания и сгорания:

$$\frac{dQ_{сг\text{ топл}}}{d\varphi} = \chi Q_T^H q_{ц} \frac{dx}{d\varphi},$$

где χ — коэффициент использования теплоты топлива; Q_T^H — низшая теплотворная способность топлива; $q_{ц}$ — цикловая подача топлива; x — текущая относительная доля тепла, выделившегося от сгорания топлива.

Относительная скорость тепловыделения задается в виде полуэмпирической функции И. И. Вибе [3]

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{c(m+1)}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi - \theta}{\varphi_z} \right)^m \exp \left[c \left(\frac{\varphi - \theta}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right]$$

с коэффициентами, заданными для номинального режима работы двигателя $m = 2$, $\varphi_z = 65$ град ПВ, $\theta = 350$ град ПВ и $c = -6,908$. Принятые величины

коэффициентов описывают закон тепловыделения, свойственный выгоранию бензинов (продолжительность выгорания 95 % цикловой подачи топлива при $n_{дв} = 4000$ об/мин при заданных коэффициентах составляет 3–5 мс).

График относительной скорости тепловыделения в результате выгорания бензо-воздушной смеси представлен на рис. 5.

Скорости течения и расход рабочего тела через каналы (всасывания, перепуска, выпуска) определялись из известных из теории газовой динамики зависимостей.

Энергообмен в элементах РПД, сопутствующий массообмену, определялся как произведение энтальпии рабочего тела на его поток.

Энергообмен в виде механической работы (с учетом знака, в зависимости от знака $dV/d\varphi$) определялся из соотношения $dL/d\varphi = p(dV/d\varphi)$.

В основу описания процесса теплообмена со стенками камер положено уравнение Ньютона–Рихмана

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \frac{1}{6n_{дв}} \alpha_w (T_{стенки} - T_{раб. тела}) F_{контакта},$$

где α_w — коэффициент теплоотдачи (принят в соответствии с формулой, предложенной Эйхельбергом [3], равным $\alpha_w = 2,1\sqrt{pT} \sqrt[3]{C_m} \cdot 1,164$; умножение на коэффициент 1,164 переводит размерность ккал/(м²·ч·°С) в размерность Вт/(м²·К)).

Текущая температура рабочего тела для камер блока всасывания и блока сгорания определяется с использованием результатов интегрирования уравнений (1) и (2) на основе термодинамических функций вида $T = f(u)$, где u — удельная внутренняя энергия рабочего тела, находящегося в камерах ($u = U/G$). Текущее давление в камерах определяется из уравнения состояния Клапейрона–Менделеева. Интегрирование системы уравнений (1) и (2) выполнялось с помощью метода

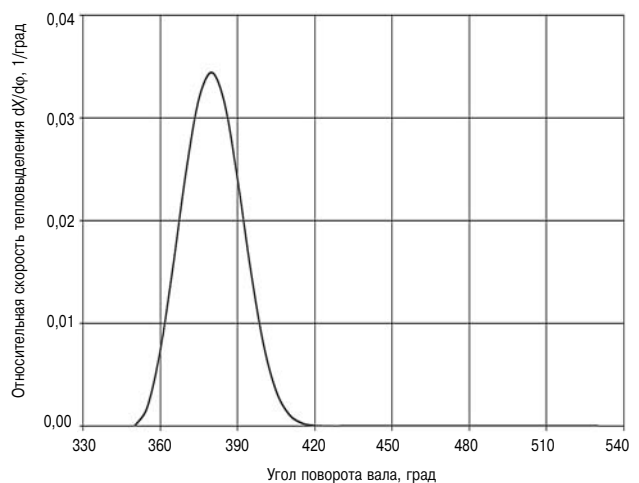


Рис. 5. Относительная скорость тепловыделения в функции от угла поворота вала

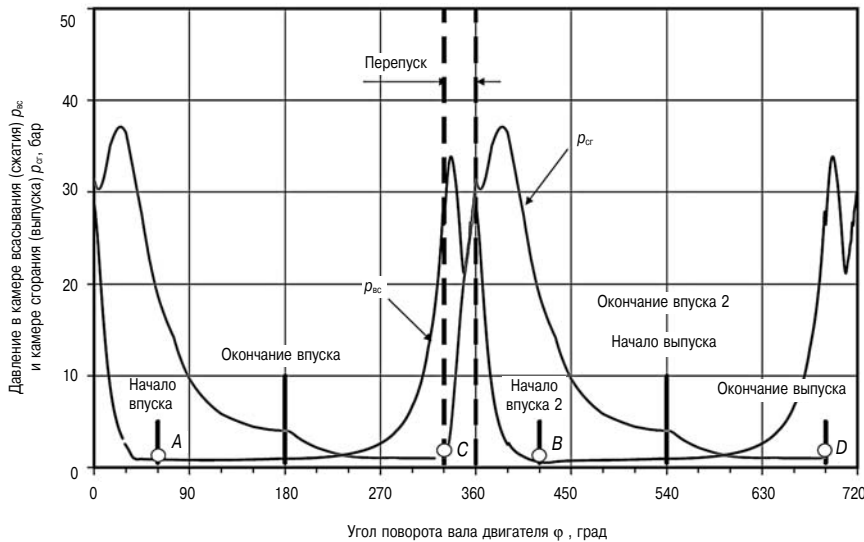


Рис. 6. Изменение давления рабочего тела в камерах РПД

конечных разностей с прогнозированием значений параметров в центре интегрируемого участка (применялся улучшенный метод Эйлера). Интервал дискретизации процесса был выбран 1 град ПВ. Интегрирование уравнений, а также все необходимые расчетные операции выполнялись в среде программирования «Excel-2003» (ОС «Windows»).

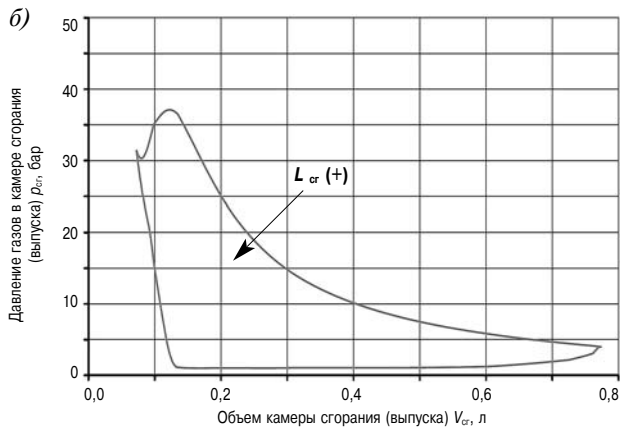
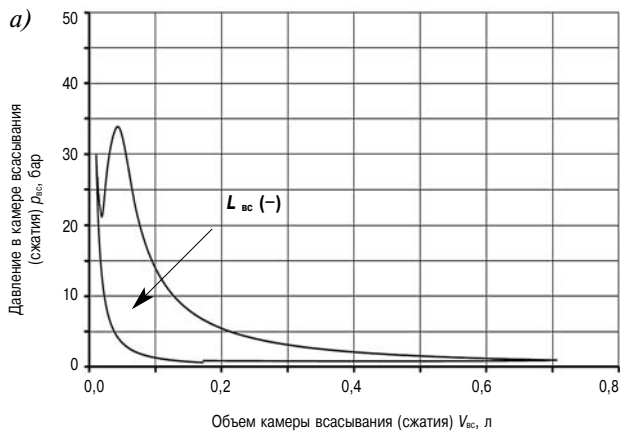


Рис. 7. Индикаторные процессы блоков всасывания (а) и сгорания (б)

Ниже приводятся результаты численного моделирования рабочего процесса двухблочного РПД. На рис. 6 приведены графики изменения давления в камерах двигателя в функции от угла поворота вала двигателя, полученные при моделировании номинального режима работы двигателя.

Из рис. 6 видно, что элементарный цикл, протекающий в блоке всасывания (заклучен между точками А и В) включает в себя четыре процесса: выпуск (от А до 180 град ПВ), сжатие (от 180 град ПВ до С), перепуск (от С до 360 град ПВ) и последующее расширение (от 360 град ПВ до В). Элементарный цикл блока сгорания (заклучен между точками С и D) включает в себя три процесса: перепуск (от С до 360 град ПВ), сгорание–расширение (от 360 град ПВ до 540 град ПВ), свободный и принудительный выпуск (от 540 град ПВ до D). Элементарные циклы в обоих

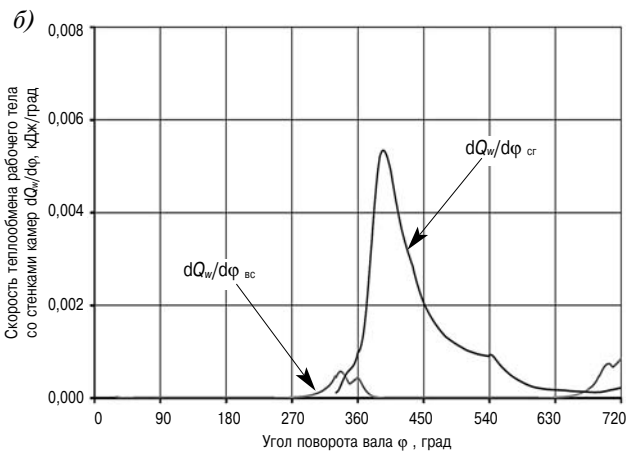
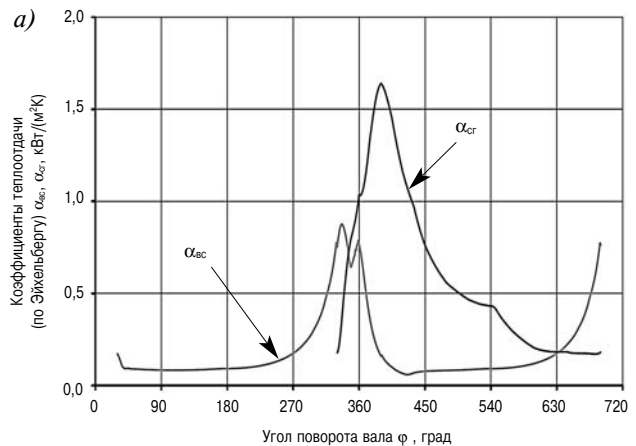


Рис. 8. Изменение коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{вс}$ и $\alpha_{ср}$ (а) и скоростей теплообмена в камерах двигателя $dQ_w/d\phi_{вс}$ и $dQ_w/d\phi_{ср}$ (б) в зависимости от угла ПВ

Параметры рабочего процесса двигателя, полученные в результате математического моделирования

Наименование параметра	Значение параметра
Частота вращения вала двигателя $n_{дв}$	4000 об/мин
Блок всасывания	
Индикаторная работа, совершаемая рабочим телом (РТ) $L_{i\text{ вс}}$	-0,3178 кДж
Коэффициент наполнения камеры всасывания η_v	0,902
Масса свежего заряда в конце процесса всасывания $G_{вс}$	0,745 г
Масса остаточного заряда в камере сжатия после завершения процесса перепуска, $G_{вс\text{ ост}}$	0,149 г
Тепло, отведенное от РТ в стенки блока всасывания $Q_{w\text{ вс}}$	0,0246 кДж (1,44 %)
Максимальная температура РТ в камере сжатия $T_{\text{max вс}}$	817 К
Максимальное давление РТ в камере сжатия $p_{\text{max вс}}$	33,8 бар
Блок сгорания	
Индикаторная работа, совершаемая РТ $L_{i\text{ сг}}$	0,8178 кДж
Масса остаточных газов в камере сгорания в начале перепуска $G_{сг\text{ ост}}$	0,0494 г
Количество свежего заряда, поступившего в камеру сгорания в процессе перепуска $G_{пер}$	0,5946 г
Цикловая подача топлива $q_{\text{ цикл}}$	0,0388 г
Коэффициент избытка воздуха при сгорании $\alpha_{сг}$	1,05
Тепло, соответствующее цикловой подаче топлива $Q_{\text{т цикл}}$	1,706 кДж (100 %)
Тепло, отведенное от РТ в стенки блока сгорания $Q_{w\text{ сг}}$	0,484 кДж (28,4 %)
Максимальная температура РТ в камере сгорания $T_{\text{max сг}}$	2777 К
Максимальное давление РТ в камере сгорания $p_{\text{max сг}}$	37,1 бар
Интегральные характеристики двигателя	
Суммарная индикаторная работа элементарного цикла $L_{i\text{ сум}}$	0,500 кДж (29,3 %)
Удельный инд. расход топлива (привед. к $Q_{\text{т}}^H = 43\,930$ кДж/кг) g_i	279,6 г/(кВт·ч)
Суммарная потеря энергии в результате массообмена с окружающей средой $U_{\text{пот}}$	0,705 кДж (41,3 %)
Механический КПД двигателя	0,9
Эффективная работа элементарного цикла L_e	0,450 кДж (26,4 %)
Эффективная мощность элементарного цикла $P_{e\text{ ц}}$	15,00 кВт
Эффективная мощность двигателя, снимаемая с двух блоков (от процессов, протекающих одновременно в 4-х камерах) P_e	60 кВт
Удельный эффективный расход топлива (привед. к $Q_{\text{т}}^H = 43\,930$ кДж/кг) g_e	310,6 г/(кВт·ч)

Примечание. В процентах указана доля энергии, отнесенная к теплоте, заключенной в цикловой подаче топлива

блоках совершаются в течение 360 град ПВ. На рис. 7 приведены индикаторные процессы $p = f(V)$, происходящие в блоках двигателя.

Индикаторная работа элементарного цикла блока всасывания ($L_{i\text{ вс}}$) отрицательна, блока сгорания ($L_{i\text{ сг}}$) — положительна. Индикаторная работа, получаемая от элементарных циклов, происходящих в двух блоках, составляет сумму $L_{i\text{ сум}} = L_{i\text{ сг}} + L_{i\text{ вс}}$.

Процесс теплообмена, происходящий в камерах двигателя, характеризуют графики, приведенные на рис. 8.

В таблице приведены параметры рабочего процесса двигателя, полученные в результате математического моделирования.

Выполненный сравнительный анализ показывает, что двухблочный РПД несколько уступает по экономичности двигателям традиционной конструкции, однако по массогабаритным показателям он значительно превосходит их, что является бесспорным его преимуществом. Сравнение двухблочного четырехкамерного РПД и одноблочного РПД конструкции Ванкеля показывает, что характеристики их приблизительно

идентичны. Одним из достоинств исследуемого двигателя является форма его камер (профиль камер исследуемого РПД имеет форму окружности; профиль камеры РПД Ванкеля выполнен по сложной кривой — эпитрохойде). Описываемому в статье двигателю присущи «мягкая» работа, вследствие низких уровней давлений и скоростей нарастания давлений в камерах, а также хорошая динамическая уравновешенность (при работе двигателя центр тяжести роторов незначительно смещается относительно оси вала).

Литература

1. Пат. Роторный двигатель внутреннего сгорания. № 2405950. 04.02.09 (Тайц О.Г., Старокожев М.А.).
2. Гончар Б.М. Численное моделирование рабочего процесса по методу ЦНИДИ. Дизели: справочник под ред. В.А. Ваншейдта [и др.]. — Л. : Машиностроение. — 1977. — с. 87–96.
3. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. — М. : Свердловск: — Машгиз. — 1962. — 272 с.
4. Моделирование процессов в судовых поршневых двигателях и машинах/ В.В. Лаханин, О.Н. Лебедев, В.С. Семенов, К.Е. Чуешко. — Л. : Судостроение. — 1967. — 271 с.