

Энергетика и электротехника

УДК 621.43

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-88-94

Анализ концепции роторно-поршневого двигателя с реализацией цикла газотурбинного двигателя $V = \text{const}$

В.И. Богданов, А.К. Дормидонтов, И.А. Немтырева

ПАО «ОДК-Сатурн»

Analysis of the rotor-piston engine concept with the implemented GTE cycle at the constant volume

V.I. Bogdanov, A.K. Dormidontov, I.A. Nemtyreva

PJSC "UEC-Saturn"

Для существенного повышения эффективности двигателя внутреннего сгорания требуются новые концептуальные решения. Применение в нем выносной золотниковой камеры сгорания постоянного объема, конструктивное разделение процессов сжатия и расширения может обеспечить многотопливность, качественное повышение экономичности и значительно упростить коробку переключения передач. Чтобы качественно улучшить характеристики двигателя внутреннего сгорания, необходим системный анализ созданного научно-технического задела с последующим комплексным внедрением. В качестве примера на базе такого задела по роторно-поршневому двигателю (ЦИАМ) с золотниковой камерой сгорания постоянного объема (ПАО «ОДК-Сатурн») рассмотрена концепция двигателя внутреннего сгорания с продолженным расширением и возможностью приблизиться к реализации цикла газотурбинного двигателя при постоянном объеме высокой экономичности. Предложенная концепция позволяет эффективно реализовать перспективные технологии отделения азота и STIG-технологии дальнейшего повышения экономичности.

Ключевые слова: ДВС, камера сгорания постоянного объема, продолженное расширение, коробка переключения передач, роторно-поршневой двигатель, STIG-технология

New conceptual solutions are required to significantly increase the internal combustion engine efficiency. Introducing external spool combustion chamber of constant volume and structural separation of the compression and expansion processes in its design are able to provide multi-fuel capacity, qualitative increase in the efficiency and significantly simplify the gearbox. In order to qualitatively improve characteristics of the internal combustion engine, systematic analysis of the created scientific and technical potential is required, followed by comprehensive implementation. The paper considers a concept of an internal combustion engine with continued expansion and ability to approach the gas turbine engine cycle implementation at constant volume with high efficiency on the example of such a basis

using the rotary piston engine (CIAM) with the spool combustion chamber of constant volume (PJSC “UEC-Saturn”). The proposed concept makes it possible to effectively implement promising technologies for nitrogen separation and STIG technologies for further increase in the efficiency.

Keywords: internal combustion engine, constant volume combustion chamber, continued expansion, gearbox, rotary piston engine, STIG technology

Энергетические характеристики наземного транспорта определяет двигатель внутреннего сгорания (ДВС). В авиации для реализации мощности до 368 кВт (500 л.с.) также применяют ДВС. Однако зарубежное двигателестроение ориентировано на электрические или гибридные силовые установки, определены жесткие сроки перехода на них.

Вместе с тем по тепловым двигателям накоплен огромный невостребованный научно-технический задел, поэтому и характеристики ДВС можно значительно улучшить. Однако сначала необходимо систематизировать накопленные знания, а затем на их базе построить прорывные решения для создания новых технологий и перспективных двигателей [1].

Например, автоматическая коробка переключения передач (КПП) ДВС очень усложнена, а цена ее для дорогого автомобиля качественно выросла и приблизилась к одному миллиону рублей. При этом мало кто знает, что в паровозе благодаря расширению рабочего тела в отдельном узле — поршневой расширительной машине — нет КПП, увеличение момента обеспечено поздней отсечкой подачи пара.

В работе [1] приведены результаты исследований возможных концептуальных направлений совершенствования транспортных ДВС. Для развития этих направлений проведен анализ концепции роторно-поршневого двигателя (РПД) с возможностью реализации (при турбонаддуве) высокоэкономичного цикла, близкого

к циклу газотурбинного двигателя (ГТД) с подводом теплоты при постоянном объеме [1] (рис. 1).

Цель работы — расчетно-конструкторская проработка концепции ГТД ($V = \text{const}$) с применением отработанных конструкций РПД и золотниковой камеры сгорания (КС) постоянного объема (ПО) в качестве газогенератора и с возможной реализацией перспективных жаропрочных неметаллических материалов.

За основу взят РПД — демонстратор РПД-100Т разработки ЦИАМ [2]. Двигатель в классе мощности 74 кВт (100 л.с.) с турбонаддувом выполнен по типу Ванкеля и по сравнению обычными поршневыми ДВС имеет гораздо меньшие (прорывные) массогабаритные параметры, более низкий уровень вибраций и простую конструкцию [3].

Его развитием (также с турбонаддувом) стал двухсекционный РПД-350Т (рис. 2). Однако удельный расход топлива РПД на 20 % больше, чем у ДВС. При этом вследствие конструктивных особенностей в РПД не были реализованы мероприятия по повышению экономичности поршневых ДВС, разработанные и внедренные в последние десятилетия. Проблема связана с обликом КС — узкой щелью с постоянно изменяющимся объемом.

Для реализации цикла, близкого к циклу ГТД с подводом теплоты при $V = \text{const}$ предлагаются следующие концептуальные решения.

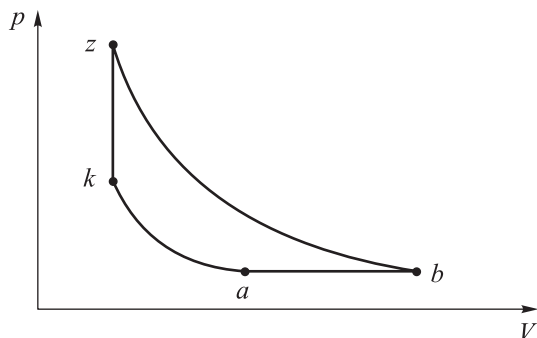


Рис. 1. Цикл ГТД с подводом теплоты при $V = \text{const}$

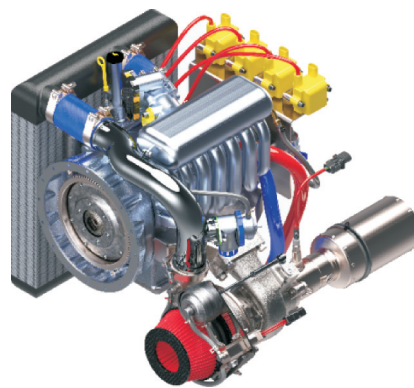


Рис. 2. Внешний вид двухсекционного двигателя РПД-350Т

1. Применение выносной КС ПО (рис. 3) нового типа с вращающимся золотником. КС объемом 400 см^3 с лабиринтными уплотнениями отработана в ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск) на стехиометрических смесях. Так как КС — многотопливная, цетановые и октановые числа значения не имеют [4, 5]. В процессе доводки отпала необходимость в системе охлаждения сферической жаровой трубы.

В 90-е годы в ОАО «Автодвигательсервис» (г. Заволжье, Нижегородская область) была предпринята попытка создания автомобильного ДВС с КС ПО объемом 30 см^3 . Применение такой КС обеспечило многотопливность и повысило экономичность экспериментального ДВС. Однако вследствие малой размерности в КС пришлось установить контактные уплотне-

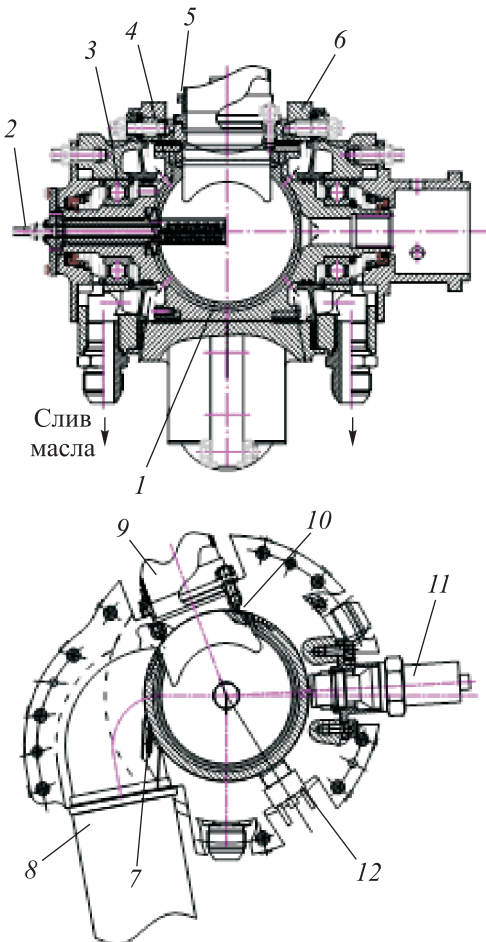


Рис. 3. Конструктивная схема КС ПО с лабиринтными уплотнениями:

1 — сферическая жаровая труба; 2 — свеча зажигания; 3 — подшипник качения; 4 — ротор-золотник; 5 — лабиринтное уплотнение; 6 — корпус; 7 — решетка направляющего аппарата; 8 и 9 — выхлопной и входной патрубки; 10 — сопло в золотнике; 11 — топливная форсунка; 12 — датчик давления

ния (между золотником и корпусом), которые для достижения заданного ресурса требуют большого объема доводочных работ.

Одновременно специалисты ОКБ РПД (АвтоВАЗ, г. Тольятти) рассматривали использование этой КС для повышения экономичности РПД. Проблему уплотнений в КС малой размерности можно решить применением жаропрочных керамических или композиционных материалов, обеспечивающих стабильность минимальных зазоров в лабиринтах.

2. Разнесение по секциям процессов сжатия и расширения, позволяющее организовать продолженное расширение для повышения экономичности (даже без турбонаддува). Первая секция работает как компрессор с двумя рабочими полостями, при этом конструкция меняется мало, контактные уплотнения — существующие. Вторая секция функционирует как расширительная машина (рис. 4) с двумя рабочими полостями.

Для реализации продолженного расширения длина второй секции увеличена. На рис. 4 показана конфигурация роторной расширительной

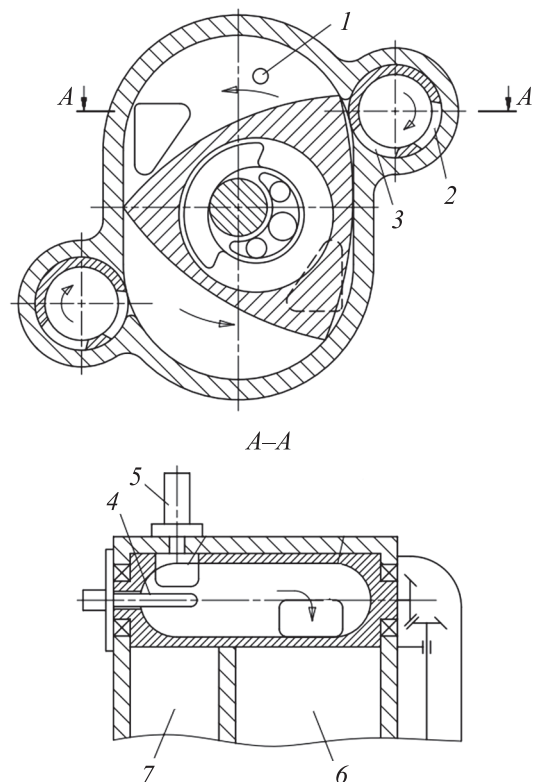


Рис. 4. Схема роторной расширительной машины с однополостными КС ПО:

1 — отверстие для впуска воздуха; 2 и 3 — впускное и выпускное окно; 4 — свеча зажигания; 5 — топливная форсунка; 6 — расширительная машина; 7 — компрессор

машины в момент начала истечения газа из КС. Здесь КС ПО имеет два окна: впускное 2 для воздуха и выпускное 3 для газа. Продолженное расширение при реализации турбонаддува, в отличие от традиционных ДВС с турбонаддувом, снижает потери на импульсный выхлоп, т. е. давление газа на выпуске близко к давлению перед турбиной. Такой цикл, близкий к циклу ГТД с подводом теплоты при $V = \text{const}$ (см. рис. 1), далее будем условно называть циклом ГТД $V = \text{const}$.

3. Изготовление расширительной машины с применением жаропрочных неметаллических материалов и лабиринтных уплотнений [6, 7]. Исследования винтовых компрессоров (объемного типа), не имеющих контактных уплотнений, в качестве расширительной машины, показали увеличение их коэффициента полезного действия (КПД) до 0,9 [8] (как и в лопаточных машинах, КПД турбины больше, чем КПД компрессора). Следует отметить, что в РПД-100Т и РПД-350Т реализованы стехиометрические температуры.

Для облегчения понимания процессов сгорания и расширения на рис. 5 показан фрагмент видеоизображения этих процессов в ГТД [1], где в качестве турбины высокого давления использована роторно-поршневая расширительная машина совместно с трехполостными КС ПО.

В ПАО «ОДК-Сатурн» проведены предварительные расчетные исследования реализации цикла ГТД $V = \text{const}$ при следующих исходных данных и допущениях: КПД сжатия — 0,8; КПД расширения — 0,9; температура сгорания — 2600 К.

Результаты этого исследования в виде зависимости эффективного КПД η_e от степени по-

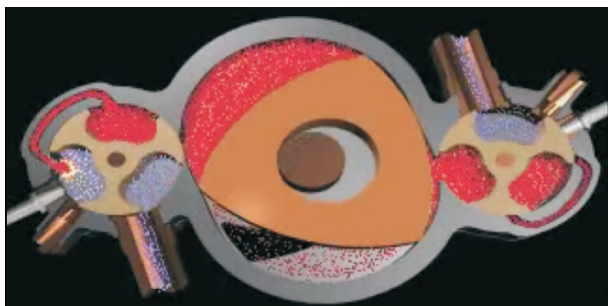


Рис. 5. Фрагмент видеоизображения, иллюстрирующего работу роторно-поршневой расширительной машины с трехполостными КС ПО (вращение роторного поршня по ходу часовой стрелки)

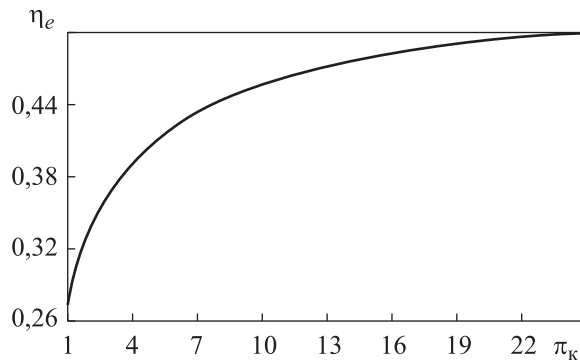


Рис. 6. Зависимость эффективного КПД η_e от степени повышения давления в компрессоре π_k при температуре сгорания $T_z = 2600$ К

вышения давления в компрессоре π_k при температуре сгорания $T_z = 2600$ К приведены на рис. 6.

Анализ показывает, что цикл ГТД $V = \text{const}$ можно реализовать при использовании роторно-поршневой расширительной машины со степенью повышения давления в компрессоре $\pi_k = 13$. Рекордный уровень эффективного КПД $\eta_e = 0,47$, что выше, чем у дизеля. Полученный результат следует считать предварительным.

В состав РПД также входит усилитель крутящего момента (УКМ) [9], позволяющий упростить КПП. УКМ включает в себя управляемый клапан, способный подавать воздух от источника сжатого воздуха, которым может быть и двигательный компрессор с регулируемым расходом, и даже тормозная пневмосистема транспортного средства. Воздух подается через отверстие 1 (см. рис. 4) при определенном положении роторного поршня.

УКМ работает следующим образом. На малой частоте вращения вала РПД (начальный разгон транспортного средства с места) в КС подается избыточное топливо в 1,3–1,6 раз больше, чем нужно для полного сгорания. При этом образуется газ и химически высокоактивное горючее. При включенном УКМ в процессе расширения при определенном положении роторного поршня через отверстие 1 в торцевой части корпуса секции поступает сжатый воздух.

Подаваемый воздух (на время начального разгона) способствует дожиганию переобогащенной смеси при давлении, близком к постоянному, т. е. дальнейшее вращение роторного поршня происходит без падения давления с увеличенным крутящим моментом на валу (аналог поздней отсечки пара в паровой машине).

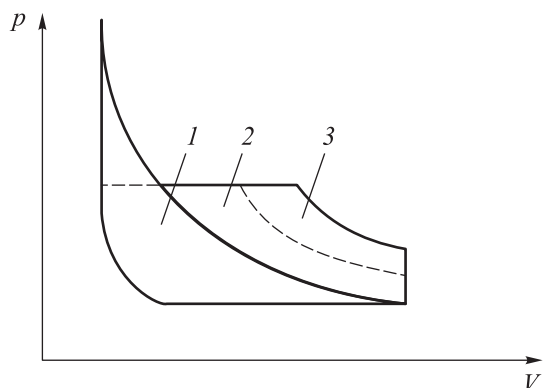


Рис. 7. p - V -диаграмма РПД в различных положениях УКМ:
1 — УКМ выключен; 2 — УКМ частично включен;
3 — УКМ полностью включен

При этом площадь известной p - V диаграммы, а значит, и работа (рис. 7) растет. При максимальной подаче топлива (положение 3) она достигает наибольшего значения, что соответствует максимальному крутящему моменту. На промежуточном (частичном) режиме работы УКМ при меньшей по времени избыточной подаче топлива площадь диаграммы будет меньше (положение 2), что должно упростить КПП.

Как уже указывалось, разделение рабочих процессов — сжатия, сгорания и расширения — по разным узлам, как в ГТД, позволяет реализовать термодинамические преимущества цикла ГТД при $V = \text{const}$ с общепринятыми обозначениями a - c - z - b (см. рис. 1). Одно из них заключается в том, что температура сгорания влияет на экономичность уже на уровне термического КПД, т. е. сжигание стехиометрических смесей является целесообразным.

При этом для большого давления сгорания ($p > 7$ МПа) в дизельном двигателе не важно, как его получить — увеличением степени повышения давления в компрессоре (затратным увеличением работы сжатия и массы конструк-

ции) или путем эффективного сгорания в выносной КС ПО.

В работах [10–12] показана термодинамическая целесообразность охлаждения воздуха на сжатии и повышения T_z при обогащении воздуха кислородом за счет мембранного отделения азота. Кроме того, это позволит снизить выбросы оксидов азота. Так, при обогащении кислородом до 40 %, снижение выбросов оксидов азота может составить 78 % по сравнению с использованием для сгорания обычного воздуха (21 % кислорода) [10].

Высокая удельная мощность [11] (более 1000 кВт/кг/с и, соответственно качественное уменьшение расхода рабочего тела) упрощает реализацию технологии отделения азота и перспективную STIG-технологии (с впрыском воды в КС и ее последующим возвратом в рабочий процесс) для дальнейшего повышения экономичности [13–15]. Это делает еще более перспективной реализацию предложенной концепции ДВС.

Вывод

Предложена концепция ДВС с реализацией цикла ГТД $V = \text{const}$ на базе созданных РПД, КС ПО и обоснованных конструкторских решений.

Использование рассмотренной концепции обеспечит РПД следующие достоинства:

- улучшение массогабаритных характеристик до уровня, свойственного РПД;
- многотопливность;
- более высокую экономичность, чем у дизельного двигателя;
- возможность упрощения КПП (для транспортных средств) и дальнейшее повышение экономичности за счет эффективной реализации перспективных технологий отделения азота и STIG-технологий.

Литература

- [1] Богданов В.И., Холманова М.А. Возможные концептуальные направления совершенствования транспортных ДВС. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 53–61, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-53-61>
- [2] Минин В.П., Костюченков А.Н., Замышляев В.А. *Разработка демонстратора авиационного роторно-поршневого двигателя в классе мощности 100 л.с.* URL: <http://piston-engines.ru> (дата обращения: 21.12.2022).
- [3] Кочеров Е.П., Кононов В.А., Окорочков В.В. и др. К вопросу о развитии тематики роторно-поршневых двигателей за рубежом и в России. *Вестник СГАУ им. С.П. Королёва*, 2011, № 3–4, с. 207–214.

- [4] Богданов В.И., Кузменко М.Л. *Камера сгорания газотурбинного двигателя*. Патент РФ 2196906. Заявл. 05.07.2000, опублик. 20.01.2003.
- [5] Богданов В.И., Кузнецов С.П. Результаты экспериментальной отработки золотниковой камеры сгорания постоянного объема. *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*, 2011, № 2, с. 123–130.
- [6] Сударев А.В., Гецов Л.Б. Перспективные газотурбинные установки из конструкционных керамических материалов. В: *Материалы и прочность деталей газовых турбин*. Кн. 2. Рыбинск, Газотурбинные технологии, 2011, с. 397–433.
- [7] Чернышев Д. «Star Rotor»-еще одна попытка. *Двигатель*, 2004, № 6, с. 36–37.
- [8] Михайлов А.К., Ворошилов В.П. *Компрессорные машины*. Москва, Энергоатомиздат, 1989. 286 с.
- [9] Богданов В.И. Автомобиль и его двигатель — возможные перспективы развития. *Автомобильная промышленность*, 2009, № 1, с. 25–28.
- [10] Казарян Т.С., Седых А.Д., Гайнуллин Ф.Г. и др. *Мембранная технология в решении экологических проблем газовой промышленности*. Москва, Недра, 1997. 226 с.
- [11] Богданов В.И., Буракова Л.И. Эффективность применения отделения азота и охлаждения воздуха на сжатии в перспективных энергетических ГТУ со сгоранием топлива при $V = \text{const}$. *Газотурбинные технологии*, 2009, № 6, с. 30–32.
- [12] Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 640 с.
- [13] MTU планирует участвовать в программе Boeing по разработке нового узкофюзеляжного самолета. *Обзор по материалам иностранных публикаций ЦИАМ. Серия: авиационное двигателестроение*, 2022, № 11/12. Ноябрь.
- [14] Цанев С.В., ред., Буров В.Д., Ремезов А.Н. *Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций*. Москва, Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.
- [15] Беляев В.Е. Газотурбинные установки с энергетическим впрыском пара. *Газотурбинные технологии*, 2002, № 4, с. 20–24.

References

- [1] Bogdanov V.I., Kholmanova M.A. Potential conceptual developments for the improvement of transport internal combustion engines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostrenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 11, pp. 53–61, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-53-61> (in Russ.).
- [2] Minin V.P., Kostyuchenkov A.N., Zamyshlyayev V.A. *Razrabotka demonstratora aviatsionnogo rotorno-porshnevoogo dvigatelya v klasse moshchnosti 100 l.s* [Development of an aircraft rotary piston engine demonstrator in the 100 hp class.]. URL: <http://piston-engines.ru> (accessed: 21.12.2022). (In Russ.).
- [3] Kocherov E.P., Kononov V.A., Okorochkov V.V. et al. Issues of evolution of rotor piston engines' subject abroad and in Russia. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva*, 2011, no. 3–4, pp. 207–214. (In Russ.).
- [4] Bogdanov V.I., Kuzmenko M.L. *Kamera sgoraniya gazoturbinnoogo dvigatelya* [Combustion chamber of gas turbine engine]. Patent RU 2196906. Appl. 05.07.2000, publ. 20.01.2003. (In Russ.).
- [5] Bogdanov V.I., Kuznetsov S.P. Some results of experimental refining of a constant volume valve combustion chamber. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva*, 2011, no. 2, pp. 123–130. (In Russ.).
- [6] Sudarev A.V., Getsov L.B. Perspektivnyye gazoturbinnyye ustanovki iz konstruksionnykh keramicheskikh materialov [Promising gas turbine units made of structural ceramic materials]. V: *Materialy i prochnost detaley gazovykh turbin*. Кн. 2 [Materials, properties, damages, models of deformation and fracture. Vol. 2]. Rybinsk, Gazoturbinnyye tekhnologii Publ., 2011, pp. 397–433. (In Russ.).
- [7] Chernyshev D. "Star Rotor"-another attempt. *Dvigatel*, 2004, no. 6, pp. 36–37. (In Russ.).
- [8] Mikhaylov A.K., Voroshilov V.P. *Kompressornye mashiny* [Compressor machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 286 p. (In Russ.).

- [9] Bogdanov V.I. Automobile and its engine — possible development perspectives. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2009, no. 1, pp. 25–28. (In Russ.).
- [10] Kazaryan T.S., Sedykh A.D., Gaynullin F.G. et al. *Membrannaya tekhnologiya v reshenii ekologicheskikh problem gazovoy promyshlennosti* [Membrane technology in solving ecological problems of gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 1997. 226 p. (In Russ.).
- [11] Bogdanov V.I., Burakova L.I. Efficiency of application of nitrogen separation and compression air cooling in advanced power GTUs with fuel combustion at $V = \text{const}$. *Gazoturbinye tekhnologii*, 2009, no. 6, pp. 30–32. (In Russ.).
- [12] Eliseev Yu.S., Manushin. E.A., Mikhaltsev V.E. et al. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas-turbine and combined installations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 640 p. (In Russ.).
- [13] MTU planiruet uchastvovat v programme Boeing po razrabotke novogo uzkofyuzelyazhnogo samoleta. *Obozrenie po materialam inostrannykh pulikatsiy TsIAM. Seriya: aviatsionnoe dvigatelestroenie*, 2022, no. 11/12. Noyabr.
- [14] Tsanev S.V., red., Burov V.D., Remezov A.N. *Gazoturbinye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas turbine and steam-gas units of thermal power plants]. Moscow, Izd-vo MEI Publ., 2002. 584 p. (In Russ.).
- [15] Belyaev V.E. Gas-turbine installations with power steam injection. *Gazoturbinye tekhnologii*, 2002, no. 4, pp. 20–24. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.03.2023

Информация об авторах

БОГДАНОВ Василий Иванович — доктор технических наук, эксперт. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 163, e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru).

ДОРМИДОНТОВ Алексей Константинович — кандидат технических наук, начальник конструкторской бригады. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 163, e-mail: dormidontov_a@mail.ru).

НЕМТЫРЕВА Ирина Александровна — кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор. ПАО «ОДК-Сатурн» (152903, Рыбинск, Российская Федерация, проспект Ленина, д. 163, e-mail: irina.nemtyreva@yandex.ru).

Information about the authors

BOGDANOV Vasilii Ivanovich — Doctor of Science (Eng.), expert. PJSC “UEC-Saturn” (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: bogdanov-vasiliy@yandex.ru).

DORMIDONTOV Aleksey Konstantinovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Design Team. PJSC “UEC-Saturn” (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: dormidontov_a@mail.ru).

NEMTYREVA Irina Aleksandrovna — Candidate of Science (Eng.), Leading Design Engineer. “PJSC UEC-Saturn” (152903, Rybinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 163, e-mail: irina.nemtyreva@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Богданов В.И., Дормидонтов А.К., Немтырева И.А. Анализ концепции роторно-поршневого двигателя с реализацией цикла газотурбинного двигателя $V = \text{const}$. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 88–94, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-88-94

Please cite this article in English as:

Bogdanov V.I., Dormidontov A.K., Nemtyreva I.A. Analysis of the rotor-piston engine concept with the implemented GTE cycle at the constant volume. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 88–94, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-88-94