

УДК 621.512

Разработка опытного образца поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с регенеративным теплообменом и стенда для его исследования

Е.Ю. Носов¹, В.Е. Щерба¹, А.К. Кужбанов¹, В.Ю. Куденцов¹,
Н.С. Галдин², М.И. Гильдебрандт¹, А.А. Гладенко¹

¹ Омский государственный технический университет

² Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Development of a prototype of the piston hybrid energy machine of volumetric action with the regenerative heat exchange and a bench for its study

E.Yu. Nosov¹, V.E. Shcherba¹, A.K. Kuzhbanov¹, V.Yu. Kudentsov¹,
N.S. Galdin², M.I. Gildebrandt¹, A.A. Gladenko¹

¹ Omsk State Technical University

² Siberian State Automobile and Highway University

Рассмотрены поршневые гибридные энергетические машины с регенеративным теплообменом, имеющие высокие массогабаритные показатели и реализующие самый эффективный способ отвода теплоты с помощью регенеративного теплообмена. На основе ранее предложенного способа работы системы жидкостного охлаждения поршневого компрессора создан опытный образец поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с регенеративным теплообменом и стенд для его исследования. Экспериментальный стенд позволяет оперативно и точно проводить измерения как основных термодинамических параметров, оказывающих непосредственное влияние на рабочие процессы этой машины, так и ее основных интегральных характеристик. С помощью созданного опытного образца и экспериментального стенда для его исследования запланировано подтвердить результаты ранее выполненных теоретических исследований по гранту РНФ (№ 22-29-00399) и получить новые знания о работе поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с регенеративным теплообменом.

EDN: CMEQDO, <https://elibrary/cmeqdo>

Ключевые слова: поршневая гибридная энергетическая машина, регенеративный теплообмен, опытный образец, экспериментальный стенд

The article considers the piston hybrid power machines with regenerative heat exchange having the high mass-dimensional parameters and implementing the most efficient methods in heat removal using the regenerative heat exchange. Based on the previously proposed method of the liquid cooling system operation in a piston compressor, a prototype of the piston hybrid power machine of volumetric action with the regenerative heat exchange was created, as well the bench for its study. The bench allows for prompt and accurate measurement of the main thermodynamic parameters that directly affect the working processes of this machine, as well as for measuring its main integral characteristics. Using the created

prototype and the experimental bench for its study, it is planned to confirm results of the previously performed theoretical studies under the Grant of the Russian Science Foundation (No. 22-29-00399) and obtain new knowledge on operation of the piston hybrid power machine of volumetric action with the regenerative heat exchange.

EDN: CMEQDO, <https://elibrary/cmeqdo>

Keywords: piston hybrid power machine, regenerative heat exchange, prototype, experimental bench

На привод поршневых компрессоров и насосов затрачивается значительное количество энергии, вследствие чего задача повышения их эффективности является важной и актуальной, особенно при дефиците вырабатываемой энергии. Существуют различные пути повышения их эффективности, к которым относится объединение поршневых компрессоров и насосов в единый агрегат, получивший название поршневой гибридной энергетической машины объемного действия (ПГЭМОД).

В работе [1] отмечены следующие достоинства ПГЭМОД: улучшение охлаждения компримируемого газа в компрессорной секции, ликвидация его утечек и мертвого пространства в компрессорной секции, уменьшение работы сил трения в поршневом уплотнении, снижение подводимой работы на привод поршневого насоса, улучшение (на 20...30 %) массогабаритных параметров, повышение (на 3...5 %) индикаторного изотермического коэффициента полезного действия (КПД) поршневого компрессора и его производительности (на 10...12 %).

Разработка и исследование ПГЭМОД осуществляется уже более 15 лет. За это время созданы ПГЭМОД, существенно различающиеся по конструкции. Среди них можно выделить четыре группы, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

К первой группе относятся крейцкопфные ПГЭМОД. Их конструктивные особенности, а также результаты экспериментальных и теоретических исследований подробно рассмотрены в работах [1–4].

Ко второй группе принадлежат бескрейцкопфные ПГЭМОД [5, 6], обладающие меньшими габаритными размерами и массой, чем крейцкопфные. Результаты теоретических и экспериментальных исследований машин этой группы приведены в публикациях [7–9].

К третьей группе относятся ПГЭМОД, движение охлаждающей жидкости в которых происходит вследствие скачка давления, возникающего в линии нагнетания компрессора [10, 11], а также благодаря разряжению на всасыва-

нии и перемещению вниз под действием объемных сил [12, 13]. Для интенсификации движения охлаждающей жидкости предложены конструкции, где оно происходит за счет поверхностных и объемных сил [14–18].

К четвертой группе принадлежат ПГЭМОД, основным достоинством которых является кардинальное сокращение габаритных размеров благодаря применению рабочей камеры (РК) для сжатия компримируемого газа, а затем для сжатия и перемещения охлаждающей жидкости [19–21]. Конструкция ПГЭМОД с регенеративным теплообменом, выполненная согласно патенту [19], теоретически исследована в работах [22–27].

Цель статьи — разработка опытного образца ПГЭМОД с регенеративным теплообменом и стенда для его исследования.

Принципиальная схема ПГЭМОД с регенеративным теплообменом. ПГЭМОД с регенеративным теплообменом, принципиальная схема которой приведена на рис. 1, состоит из цилиндра 1, с размещенным в нем поршнем 12. Поршень, цилиндр и клапанная плита 3 образуют РК 11, которая соединена через всасывающий клапан 2, трехходовой кран 5 с линиями всасывания газа 6 и жидкости 4. Также РК связана через нагнетательный клапан 10 и трехходовой кран 8 с линиями нагнетания газа 7 и жидкости 9.

Предположим, что трехходовой кран 5 соединяет линию всасывания газа с полостью всасывания ПГЭМОД, а трехходовой кран 8 — линию нагнетания газа с полостью нагнетания (рис. 1, а). Полагаем, что поршень находится в верхней мертвой точке (ВМТ), и при его движении вниз происходит увеличение объема РК и уменьшение в нем давления. Всасывающий клапан открывается, и газ по линии 6 через трехходовой кран 5 поступает в полость всасывания, а затем через всасывающий клапан — в РК.

Всасывание газа осуществляется до момента прихода поршня в нижнюю мертвую точку (НМТ). При перемещении поршня из НМТ в

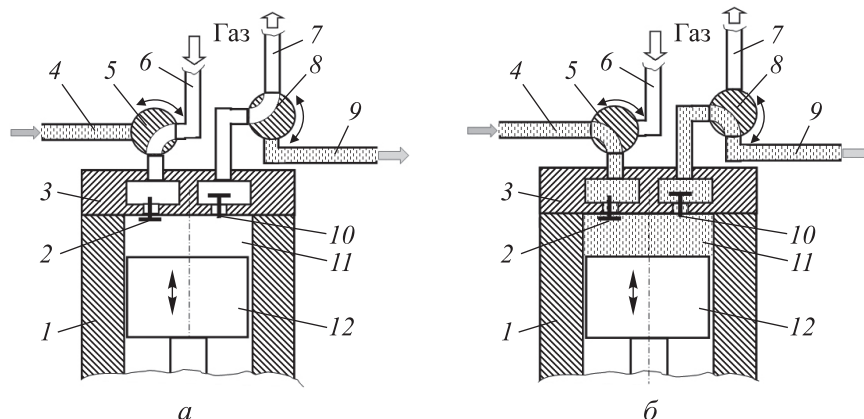


Рис. 1. Принципиальная схема ПГЭМОД с регенеративным теплообменом при работе в компрессорном (а) и насосном (б) режимах

ВМТ происходит сжатие газа в РК до номинального давления нагнетания. Нагнетательный клапан открывается, и газ из РК через нагнетательный клапан и трехходовой кран 8 проходит в линию нагнетания 7.

При работе ПГЭМОД в компрессорном режиме происходит нагрев поверхностей деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ): поршня, цилиндра и клапанной плиты, что вызывает уменьшение количества отводимой теплоты от компримируемого газа и его отклонение от изотермического. Увеличение отклонения газа от изотермического приводит к повышению подводимой технической работы в процессе сжатия и, соответственно, к уменьшению индикаторного изотермического КПД [28, 29].

Работа ПГЭМОД в компрессорном режиме прекращается в момент достижения заданной заранее температуры деталей ЦПГ или их критической температуры, определяемой температурой вспышки масла [28, 29]. После этого ПГЭМОД останавливается, а трехходовые краны 5 и 8 переключаются в положение, обеспечивающее соединение РК с линиями всасывания и нагнетания жидкости (рис. 1, б).

Поршневой насос работает аналогично поршневому компрессору. При движении поршня от ВМТ к НМТ происходят процессы расширения и всасывания, и жидкость из линии 4 поступает через всасывающий клапан в РК, а при ходе поршня от НМТ к ВМТ — сжатие и нагнетание жидкости через нагнетательный клапан в линию нагнетания жидкости 9.

Вследствие высокого коэффициента теплоотдачи между поверхностью РК и охлаждающей жидкостью РК начинает достаточно быстро охлаждаться. Тепло от стенок РК выносится

в линию нагнетания и затем к потребителю благодаря нагреву жидкости во всех четырех рабочих процессах.

Исследованию работы ПГЭМОД в насосном режиме с подводом жидкости посвящены работы [27, 30]. Помимо существенного сокращения габаритных размеров ПГЭМОД в ней наблюдается эффективный конвективный теплообмен непосредственно с поверхности РК, что выгодно отличает ее от рекуперативного теплообмена при охлаждении поверхности РК жидкостью или воздухом.

Конструктивная схема ПГЭМОД с регенеративным теплообменом. Для создания опытного образца ПГЭМОД использован серийно выпускаемый одноцилиндровый одноступенчатый поршневой компрессор ДКАС09, 3D-модель ЦПГ которого приведена на рис. 2.

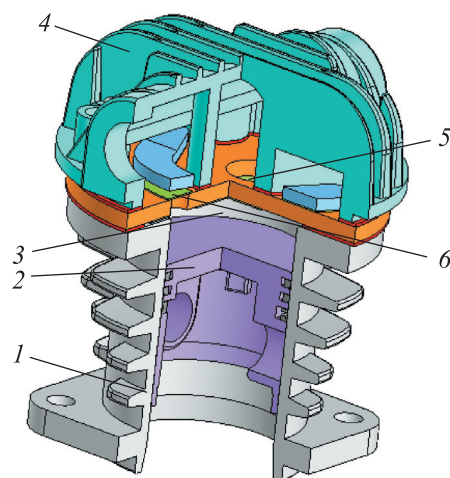


Рис. 2. 3D-модель ЦПГ опытного образца ПГЭМОД: 1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — РК; 4 — клапанная головка; 5 и 6 — всасывающий и нагнетательный клапаны

Техническая характеристика поршневого компрессора DKAC09

Диаметр поршня, мм	42
Ход поршня, мм	32
Отношение хода поршня к удвоенной длине шатуна	0,3
Диаметр всасывающего/нагнетательного клапана, мм	15/8
Максимальный подъем запорного органа всасывающего и нагнетательного клапанов, мм ..	1,5
Жесткость пружины всасывающего/ нагнетательного клапана, Н/м	1080/7580
Масса запорного органа всасывающего/ нагнетательного клапана, г	4,4/3,3

Экспериментальный стенд. Для исследования опытного образца ПГЭМОД создан экспериментальный стенд, пневмогидравлическая схема которого приведена на рис. 3.

Воздух через фильтр Ф1 поступает в трехходовой кран КТ1, а оттуда по всасывающему трубопроводу в РК ПГЭМОД с регенеративным теплообменом. Сжатый газ в РК проходит по трубопроводу в трехходовой кран КТ2, далее во влагомаслоотделитель ВД1 и ресивер РС1, а оттуда через вентиль ВН2 в расходомер газа РМ1.

Жидкость, отделенная во влагомаслоотделителе, через вентиль ВН1 перетекает в бак Б1. При переключении трехходового крана КТ1 жидкость из бака Б1 поступает по трубопроводу в РК ПГЭМОД, затем в трехходовой кран

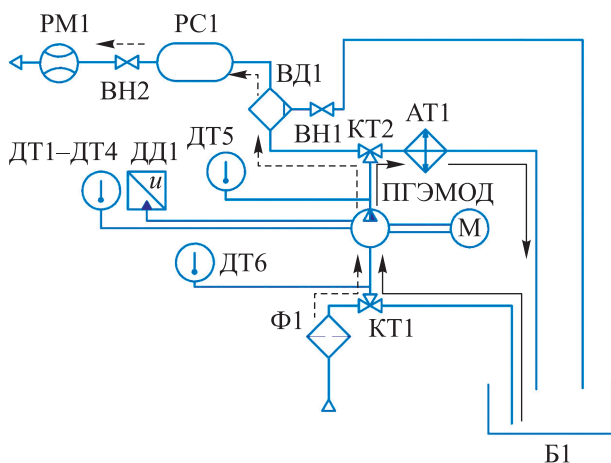


Рис. 3. Пневмогидравлическая схема
экспериментального стенда:

ДД1 — датчик мгновенного давления в рабочей полости;
ДТ1–ДТ6 — датчики температуры;
ВД1 — влагомаслоотделитель; РМ1 — расходомер газа;
РС1 — ресивер; ВН1, ВН2 — вентили;
КТ1, КТ2 — трехходовые краны; АТ1 — теплообменный
аппарат; Ф1 — фильтр; Б1 — бак; М — электродвигатель
для привода ПГЭМОД

КТ2 (который также переключен в положение для подачи жидкости) и далее в теплообменный аппарат АТ1, после охлаждения в котором подается в бак Б1.

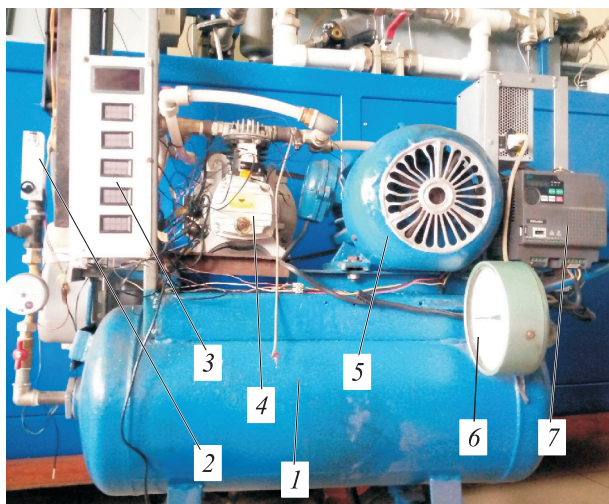
Температуру газа, жидкости и деталей ЦПГ измеряют датчики температуры ДТ1–ДТ6, мгновенное давление в РК — соответствующий датчик ДД1, а стационарное давления нагнетания — пружинный манометр. Привод ПГЭМОД осуществляет электродвигатель М. Штриховой линией на рис. 3 показано движение газа, сплошной — перемещение жидкости.

Внешний вид экспериментального стенда с опытным образцом приведен на рис. 4, а и б. Для регулирования частоты вращения коленчатого вала при работе ПГЭМОД в компрессорном и насосном режимах использован частотный преобразователь 7 (см. рис. 4, а). Согласно результатам теоретического исследования [31], значения частоты вращения коленчатого вала при работе в компрессорном и насосном режимах должны значительно различаться, что в экспериментальных исследованиях реализовано с помощью частотного преобразователя.

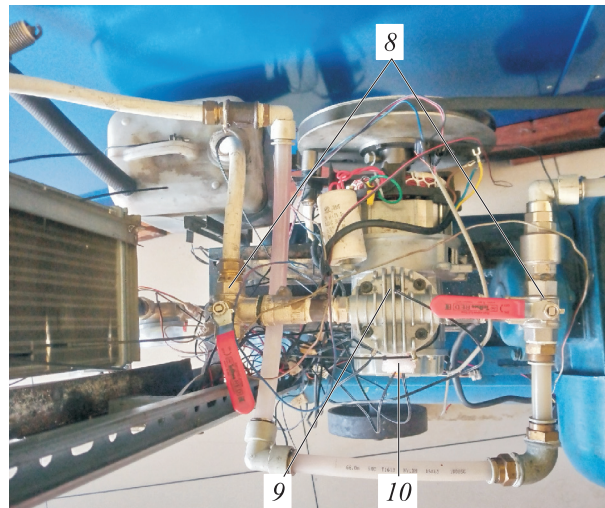
3D-модель и расчет на прочность. Для расчета на прочность основных деталей ЦПГ использована 3D-модель ЦПГ ПГЭМОД с регенеративным теплообменом (см. рис. 2). Расчет проведен в программном пакете Solid Works для диапазона планируемых давлений нагнетания при работе ПГЭМОД в компрессорном и насосном режимах. По результатам расчета установлено, что в компрессорном и насосном режимах давление нагнетания до 1 МПа является допустимым с точки зрения возникающих напряжений.

Методика измерения основных исследуемых параметров. В ходе эксперимента измеряли основные термодинамические параметры, позволяющие получить новые знания об исследуемом объекте и провести в дальнейшем верификацию разработанной математической модели. В качестве этих параметров выступали статическое и мгновенное давления, температура всасываемой и нагнетаемой рабочей среды (газа и капельной жидкости), температура деталей ЦПГ, расход газа и частота вращения коленчатого вала.

Измерение статического давления. Измерение статического давления проводили в линии нагнетания ПГЭМОД при работе в компрессор-



а



б

Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда с опытным образцом:

а — вид спереди; б — вид сверху;

1 — ресивер; 2 — ротаметр; 3 — индикаторы температуры; 4 — ПГЭМОД; 5 — электродвигатель; 6 — манометр;

7 — частотный преобразователь; 8 — трехходовые краны; 9 — датчик температуры головки цилиндра;

10 — датчики температуры цилиндра

ном и насосном режимах. В большинстве случаев этот параметр измеряют манометром, оснащенный трубкой Бурдона. В экспериментальном стенде использовали манометр МПЗ-У-УХЛ1, имеющий следующие характеристики: класс точности 1, диапазон измерения давления 0...1 МПа, степень защиты IP54, диапазон измерения температуры рабочей среды $-50...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Измерение мгновенного давления. Наибольшее применение для измерения мгновенного давления получили датчики давления, рабочим элементом которых является пьезокерамиче-

ский кристалл или тензорезистор [32]. В экспериментальном стенде применяли датчик давления на основе тензорезистора PSE530M5-1 с погрешностью измерения менее 2 %. Сигналы от датчика регистрировали с помощью аналого-цифрового преобразователя ZET230.

Измерение стационарной температуры рабочей среды. Для измерения этого параметра используют датчики, в которых чувствительный элемент меняет теплофизические свойства при изменении температуры. Наиболее эффективные с точки зрения точности, простоты и цены являются датчики, основанные на изменении удельного сопротивления при изменении температуры. В экспериментальном стенде устанавливали датчики температуры NTC 10k с диапазоном измерения $-20...+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ и погрешностью $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внешний вид фрагмента опытного образца ПГЭМОД с датчиками температуры и датчиком мгновенного давления показан на рис. 5.

Измерение частоты вращения коленчатого вала. В компрессорном режиме работы частота вращения коленчатого вала находится в пределах $300...1000\text{ мин}^{-1}$, а в насосном — $100...300\text{ мин}^{-1}$. Для измерения частоты вращения коленчатого вала применяли тахометр с датчиком Холла, имеющий следующие характеристики: диапазон измерения $5...9999\text{ мин}^{-1}$, погрешность измерения $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, частота обновления дисплея — более трех раз в секунду.

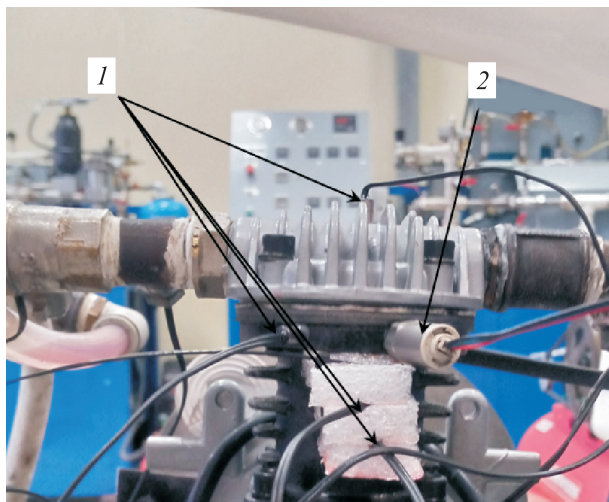


Рис. 5. Внешний вид фрагмента опытного образца ПГЭМОД с датчиками температуры 1 и датчиком мгновенного давления 2

Измерение расхода компримируемого газа. Этот параметр определяли ротаметром LZT-6T 3-15LPM с диапазоном измерения 3...15 л/мин, погрешностью $\pm 4\%$ и рабочим давлением 0,6 МПа. Следует отметить, что благодаря достаточно высокой точности и низкой стоимости ротаметр получил широкое применение в компрессорных машинах.

Измерение расхода капельной жидкости. Этот параметр не измеряли, так как номинальное давление нагнетания при работе ПГЭМОД в насосном режиме находится в пределах 0,2...1,0 МПа, а объемный КПД близок к единице [33].

Измерение потребляемой мощности электродвигателя. Потребляемую мощность электродвигателя определяли, используя вольт-амперную характеристику, которую получали с помощью токовых клещей ЕМ-402. Погрешность измерения составляла 2 %.

Выводы

1. Рассмотрена конструкция ПГЭМОД с регенеративным теплообменом, обладающая высокими массогабаритными показателями и реализующая наиболее эффективный способ отвода теплоты благодаря такому способу теплообмена.

2. На основе ранее предложенного способа работы системы жидкостного охлаждения поршневого компрессора созданы опытный образец ПГЭМОД с регенеративным теплообменом и экспериментальный стенд для его исследования. Стенд позволяет оперативно и точно проводить измерения основных термодинамических параметров (оказывающих непосредственное влияние на рабочие процессы машины) и основных интегральных характеристик ПГЭМОД.

Литература

- [1] Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P., Kaigorodov S.Yu. et al. Benefits of integrating displacement pumps and compressors. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 174–178, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1603014X>
- [2] Щерба В.Е., Павлюченко Е.А., Кужбанов А.К. Математическое моделирование процессов всасывания и нагнетания поршневого насоса с газовым демпфером. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2013, № 7, с. 26–30.
- [3] Баженов А.М., Щерба В.Е., Шалай В.В. и др. Математическое моделирование рабочих процессов поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с щелевым уплотнением ступенчатого вида. *Вестник машиностроения*, 2019, № 2, с. 55–60.
- [4] Щерба В.Е., Шалай В.В., Кондюрин А.Ю. и др. Разработка и исследование экспериментального образца поршневой гибридной энергетической машины. *Вестник машиностроения*, 2019, № 8, с. 12–17.
- [5] Щерба В.Е., Тегжанов А.С., Носов Е.Ю. и др. Сравнительный анализ массогабаритных показателей бескрейцкопфной и крейцкопфной поршневых гибридных энергетических машин объемного действия. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9, с. 88–95, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-88-95>
- [6] Shcherba V.E., Shalai V.V., Tegzhanov A.S. et al. Generalized comparative analysis of crosshead-free and crosshead schemes of piston hybrid power machines. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2020, vol. 34, no. 12, pp. 5093–5107, doi: <http://doi.org/10.1007/s12206-020-1113-4>
- [7] Щерба В.Е., Носов Е.Ю., Тегжанов А.С. и др. Экспериментальное исследование бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с интенсивным охлаждением компримируемого газа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 10, с. 78–85, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-10-78-85>
- [8] Shcherba V.E., Paramonov A.M., Blinov V.N. et al. Comparative analysis of process of cooling of compressible gas in crosshead and crossheadless hybrid positive-displacement piston power machines. *Chem. Petrol. Eng.*, 2020, vol. 55, no. 9–10, pp. 733–742, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-020-00687-x>
- [9] Shcherba V.E., Aver'yanov G.S., Kalekin V.S. et al. Calculation of rational values of discharge pressures in the compressor and pump sections of a crossheadless reciprocating hybrid power machine. *Chem. Petrol. Eng.*, 2018, vol. 54, no. 5–6, pp. 418–424, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-018-0496-x>

- [10] Lobov I.E., Shcherba V.E. Development and calculation of a liquid cooling system for a piston compressor using pressure fluctuations during gas discharge. *Chem. Petrol. Eng.*, 2016, vol. 52, no. 3–4, pp. 251–259, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-016-0183-8>
- [11] Щерба В.Е., Лобов И.Э., Болштянский А.П. и др. *Способ работы поршневой машины и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2592661. Заявл. 21.04.2015, опубл. 27.07.2016.
- [12] Щерба В.Е., Носов Е.Ю., Павлюченко Е.А. и др. Анализ динамики движения жидкости в поршневой гибридной энергетической машине с газовым объемом на всасывании. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2016, № 4, с. 15–19.
- [13] Щерба В.Е., Болштянский А.П., Кузеева Д.А. и др. *Способ работы машины объемного действия и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2578776. Заявл. 03.04.2015, опубл. 27.03.2016.
- [14] Щерба В.Е., Овсянников А.Ю., Болштянский А.П. и др. *Поршневой двухцилиндровый компрессор с автономным жидкостным охлаждением*. Патент РФ 2755967. Заявл. 20.11.2020, опубл. 23.09.2021.
- [15] Тегжанов А.С., Щерба В.Е., Болштянский А.П. *Поршневой компрессор с автономным жидкостным рубашечным охлаждением*. Патент РФ 2784267. Заявл. 29.07.2022, опубл. 23.11.2022.
- [16] Щерба В.Е., Овсянников А.Ю., Носов Е.Ю. и др. Анализ влияния интенсивности охлаждения двухцилиндровой одноступенчатой поршневой гибридной энергетической машины с движением жидкости под действием разрежения при всасывании на рабочие процессы и индикаторный КПД. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 62–72, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-62-72>
- [17] Щерба В.Е., Аверьянов Г.С., Корнеев С.А. и др. Анализ применения различных охлаждающих жидкостей в двухцилиндровой одноступенчатой поршневой гибридной энергетической машине с движением жидкости под действием разрежения на всасывании по результатам экспериментальных исследований. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 12, с. 40–49, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-40-49>
- [18] Щерба В.Е., Тегжанов А.С., Орех Д.В. Анализ процесса обратного расширения в поршневой гибридной энергетической машине с двумя всасывающими клапанами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 9, с. 77–85, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-77-85>
- [19] Щерба В.Е., Болштянский А.П., Азябин З.В. и др. *Способ работы системы жидкостного охлаждения машины объемного действия и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2763099. Заявл. 18.03.2021, опубл. 27.12.2021.
- [20] Щерба В.Е., Ходорева Е.В., Болштянский А.П. *Способ работы поршневого компрессора с регенеративным охлаждением и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2801766. Заявл. 14.10.2022, опубл. 15.08.2023.
- [21] Болштянский А.П., Щерба В.Е. *Способ работы поршневого компрессора и устройство для его осуществления (варианты)*. Патент РФ 2818615. Заявл. 15.03.2023, опубл. 03.05.2024.
- [22] Щерба В.Е. Методика оценки времени работы в компрессорном режиме поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с регенеративным теплообменом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 96–102, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-96-102>
- [23] Щерба В.Е., Дорофеев Е.А. Определение диапазонов основных эксплуатационных параметров поршневой гибридной энергетической машины с регенеративным теплообменом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 69–77, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-69-77>
- [24] Shcherba V.E. Procedure for estimating the heating time of working chamber walls in a piston compressor when implementing regenerative heat exchange. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 3–4, pp. 293–300, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-022-01090-4>
- [25] Shcherba V.E. Preliminary crankshaft speed assessment for a reciprocating hybrid power machine with regenerative heat transfer in compressor and pump modes. *Russ. Engin. Res.*, 2023, vol. 43, no. 5, pp. 529–533, doi: <http://doi.org/10.3103/S1068798X23050556>

- [26] Shcherba V.E., Khait A., Nosov E.Yu. et al. Numerical analysis of unsteady heat transfer in the chamber in the piston hybrid compressor with regenerative heat exchange. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 3, art. 363, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11030363>
- [27] Shcherba V.E. Calculation and analysis of compression and expansion in a piston hybrid power machine with regenerative heat exchange in pump mode. *Heat Mass Transfer*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 395–404, doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03435-y>
- [28] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры*. Т. 1. *Теория и расчет*. Москва, Колос, 2006. 456 с.
- [29] Фотин Б.С., ред. *Поршневые компрессоры*. Ленинград. Машиностроение, 1987. 372 с.
- [30] Shcherba V.E. Calculation and analysis of discharge and suction processes in a positive displacement hybrid reciprocating power machine with regenerative heat exchange. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 498–510, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-024-01267-z>
- [31] Shcherba V.E. Operating speeds of a hybrid reciprocating power unit in compressor and pump modes. *Russ. Engin. Res.*, 2023, vol. 43, no. 8, pp. 914–921, doi: <http://doi.org/10.3103/S1068798X23080300>
- [32] Кулебякин В.В. *Методы и приборы для измерения давления*. Минск, БНТУ, 2015. 36 с.
- [33] Башта Т.М. *Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем*. Москва. Машиностроение, 1974. 606 с.

References

- [1] Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P., Kaigorodov S.Yu. et al. Benefits of integrating displacement pumps and compressors. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 174–178, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1603014X>
- [2] Shcherba V.E., Pavlyuchenko E.A., Kuzhbanov A.K. Mathematical modeling of processes of suction and discharge in a displacement pump with gas damper. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2013, no. 7, pp. 26–30. (In Russ.). (Eng. version: *Chem. Petrol. Eng.*, 2013, vol. 49, no. 7–8, pp. 460–466, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9774-9>)
- [3] Bazhenov A.M., Shcherba V.E., Shalay V.V. et al. Mathematical modeling of the working processes of a piston hybrid energy machine of volumetric action with a slotted step seal. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.).
- [4] Shcherba V.E., Shalay V.V., Kondyurin A.Yu. et al. Development and research of an experimental sample of a piston hybrid energy machine. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 8, pp. 12–17. (In Russ.).
- [5] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S., Nosov E.Yu. et al. Comparative analysis of mass-dimensional a comparative analysis of mass-dimensional indicators of crossheadless and crosshead piston hybrid energy positive displacement machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 9, pp. 88–95, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-88-95> (in Russ.).
- [6] Shcherba V.E., Shalai V.V., Tegzhanov A.S. et al. Generalized comparative analysis of crosshead-free and crosshead schemes of piston hybrid power machines. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2020, vol. 34, no. 12, pp. 5093–5107, doi: <http://doi.org/10.1007/s12206-020-1113-4>
- [7] Shcherba V.E., Nosov E.Yu., Tegzhanov A.S. et al. An experimental study of a crossheadless piston hybrid power positive displacement machine with intensive cooling of the compressed gas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 10, pp. 78–85, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-10-78-85> (in Russ.).
- [8] Shcherba V.E., Paramonov A.M., Blinov V.N. et al. Comparative analysis of process of cooling of compressible gas in crosshead and crossheadless hybrid positive-displacement piston power machines. *Chem. Petrol. Eng.*, 2020, vol. 55, no. 9–10, pp. 733–742, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-020-00687-x>
- [9] Shcherba V.E., Aver'yanov G.S., Kalekin V.S. et al. Calculation of rational values of discharge pressures in the compressor and pump sections of a crossheadless reciprocating hybrid power machine. *Chem. Petrol. Eng.*, 2018, vol. 54, no. 5–6, pp. 418–424, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-018-0496-x>

- [10] Lobov I.E., Shcherba V.E. Development and calculation of a liquid cooling system for a piston compressor using pressure fluctuations during gas discharge. *Chem. Petrol. Eng.*, 2016, vol. 52, no. 3–4, pp. 251–259, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-016-0183-8>
- [11] Shcherba V.E., Lobov I.E., Bolshtyanskiy A.P. et al. *Sposob raboty porshnevoy mashiny i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Piston machine operation method and device for its implementation]. Patent RU 2592661. Appl. 21.04.2015, publ. 27.07.2016. (In Russ.).
- [12] Shcherba V.E., Nosov E.Yu., Pavlyuchenko E.A. et al. Analysis of fluid dynamics in a piston hybrid power machine with gas volume at suction. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye*, 2016, no. 4, pp. 15–19. (In Russ.).
- [13] Shcherba V.E., Bolshtyanskiy A.P., Kuzeeva D.A. et al. *Sposob raboty mashiny obemnogo deystviya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of operating volumetric action machine and device therefor]. Patent RU 2578776. Appl. 03.04.2015, publ. 27.03.2016. (In Russ.).
- [14] Shcherba V.E., Ovsyannikov A.Yu., Bolshtyanskiy A.P. et al. *Porshnevoy dvukhsilindrovyy kompressor s avtonomnym zhidkostnym okhlazhdeniem* [Two-cylinder reciprocating compressor with autonomous liquid cooling]. Patent RU 2755967. Appl. 20.11.2020, publ. 23.09.2021. (In Russ.).
- [15] Tegzhanov A.S., Shcherba V.E., Bolshtyanskiy A.P. *Porshnevoy kompressor s avtonomnym zhidkostnym rubashechnym okhlazhdeniem* [Reciprocating compressor with self-contained liquid jacket cooling]. Patent RU 2784267. Appl. 29.07.2022, publ. 23.11.2022. (In Russ.).
- [16] Shcherba V.E., Ovsyannikov A.Yu., Nosov E.Yu. et al. An analysis of the cooling intensity effect of a two-cylinder single-stage piston hybrid power machine with fluid flow due to vacuum at suction on the working processes and indicative efficiency. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 11, pp. 62–72, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-62-72> (in Russ.).
- [17] Shcherba V.E., Averyanov G.S., Korneev S.A. et al. An analysis of various cooling liquids in a two-cylinder single-stage piston hybrid power machine with fluid flow due to vacuum at suction based on experimental results. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 12, pp. 40–49, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-40-49> (in Russ.).
- [18] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S., Orekh D.V. Analysis of the reverse expansion process in a reciprocating hybrid power machine with two suction valves. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 9, pp. 77–85, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-9-77-85> (in Russ.).
- [19] Shcherba V.E., Bolshtyanskiy A.P., Azyabin Z.V. et al. *Sposob raboty sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya mashiny obemnogo deystviya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for operation of the liquid cooling system of the positive displacement machine and the device for its implementation]. Patent RU 2763099. Appl. 18.03.2021, publ. 27.12.2021. (In Russ.).
- [20] Shcherba V.E., Khodoreva E.V., Bolshtyanskiy A.P. *Sposob raboty porshnovego kompressora s regenerativnym okhlazhdeniem i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of operation of reciprocating compressor with regenerative cooling and device for its implementation]. Patent RU 2801766. Appl. 14.10.2022, publ. 15.08.2023. (In Russ.).
- [21] Bolshtyanskiy A.P., Shcherba V.E. *Sposob raboty porshnovego kompressora i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya (varianty)* [Method of piston compressor operation and device for implementation thereof (embodiments)]. Patent RU 2818615. Appl. 15.03.2023, publ. 03.05.2024. (In Russ.).
- [22] Shcherba V.E. Method for estimating the operating time in the compressor mode of a reciprocating hybrid power machine with regenerative heat exchange. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 10, pp. 96–102, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-96-102> (in Russ.).
- [23] Shcherba V.E., Dorofeev E.A. Determination of the areas of the main operational parameters of a reciprocating hybrid power machine with regenerative heat exchange. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 11, pp. 69–77, doi: <http://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-69-77> (in Russ.).

- [24] Shcherba V.E. Procedure for estimating the heating time of working chamber walls in a piston compressor when implementing regenerative heat exchange. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 3–4, pp. 293–300, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-022-01090-4>
- [25] Shcherba V.E. Preliminary crankshaft speed assessment for a reciprocating hybrid power machine with regenerative heat transfer in compressor and pump modes. *Russ. Engin. Res.*, 2023, vol. 43, no. 5, pp. 529–533, doi: <http://doi.org/10.3103/S1068798X23050556>
- [26] Shcherba V.E., Khait A., Nosov E.Yu. et al. Numerical analysis of unsteady heat transfer in the chamber in the piston hybrid compressor with regenerative heat exchange. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 3, art. 363, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11030363>
- [27] Shcherba V.E. Calculation and analysis of compression and expansion in a piston hybrid power machine with regenerative heat exchange in pump mode. *Heat Mass Transfer*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 395–404, doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03435-y>
- [28] Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory. T. 1. Teoriya i raschet* [Piston compressors. Vol. 1. Theory and calculation]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).
- [29] Fotin B.S., ed. *Porshnevye kompressory* [Piston compressors]. Leningrad. Mashinostroenie Publ., 1987. 372 p. (In Russ.).
- [30] Shcherba V.E. Calculation and analysis of discharge and suction processes in a positive displacement hybrid reciprocating power machine with regenerative heat exchange. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 498–510, doi: <http://doi.org/10.1007/s10556-024-01267-z>
- [31] Shcherba V.E. Operating speeds of a hybrid reciprocating power unit in compressor and pump modes. *Russ. Engin. Res.*, 2023, vol. 43, no. 8, pp. 914–921, doi: <http://doi.org/10.3103/S1068798X23080300>
- [32] Kulebyakin V.V. *Metody i pribory dlya izmereniya davleniya* [methods and devices for pressure measurement]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 36 p. (In Russ.).
- [33] Bashta T.M. *Obemnye nasosy i gidravlicheskie dvigateli gidrosistem* [Volumetric pumps and hydraulic motors of hydraulic systems]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1974. 606 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.06.2024

Информация об авторах

НОСОВ Евгений Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: nosovjon@mail.ru).

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

КУЖБАНОВ Акан Каербаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: akan05@rambler.ru).

Information about the authors

NOSOV Evgeniy Yurievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: nosovjon@mail.ru).

SHCHERBA Viktor Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

KUZHBANOV Akan Kaerbaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: akan05@rambler.ru).

КУДЕНЦОВ Владимир Юрьевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение», декан Факультета довузовской подготовки. Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: vyukudentsov@omgtu.ru).

ГАЛДИН Николай Семенович — доктор технических наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой «Подъемно-транспортные машины, механика и гидропривод». Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 5, e-mail: galdin_ns@sibadi.org).

ГИЛЬДЕБРАНДТ Маргарита Ивановна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: rita.kononova.94@mail.ru).

ГЛАДЕНКО Алексей Анатольевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: gladenko1961@yandex.ru).

KUDENTSOV Vladimir Yurievich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Aviation and Rocket Engineering, Dean of the Faculty of Preuniversity Preparation. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., bldg. 11, e-mail: vyukudentsov@omgtu.ru).

GALDIN Nikolay Semenovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Acting Head of the Department of Lifting and Transport Machines, Mechanics and Hydraulic Drives. Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Russian Federation, Russian Federation, Prospect Mira St., bldg. 5, e-mail: galdin_ns@sibadi.org).

GILDEBRANDT Margarita Ivanovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: rita.kononova.94@mail.ru).

GLADENKO Aleksey Anatolievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Prospect Mira St., Bldg. 11, e-mail: gladenko1961@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Носов Е.Ю., Щерба В.Е., Кужбанов А.К., Куденцов В.Ю., Галдин Н.С., Гильдебрандт М.И., Гладенко А.А. Разработка опытного образца поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с регенеративным теплообменом и стенда для его исследования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 90–100.

Please cite this article in English as:

Nosov E.Yu., Shcherba V.E., Kuzhbanov A.K., Kudentsov V.Yu., Galdin N.S., Gildebrandt M.I., Gladenko A.A. Development of a prototype of the piston hybrid energy machine of volumetric action with the regenerative heat exchange and a bench for its study. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 90–100.