

УДК 621.512

Разработка и исследование высокоэффективной поршневой гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами

В.Е. Щерба, А.С. Тегжанов, Г.И. Екимов

Омский государственный технический университет

Research and development of a high-efficiency piston hybrid power machine with two suction valves

V.E. Shcherba, A.S. Tegzhanov, G.I. Ekimov

Omsk State Technical University

На основе анализа главных недостатков поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с двумя всасывающими клапанами разработана принципиально новая схема такой машины с циклической подачей сжимаемого газа в полость всасывания для организации необходимых поверхностных сил, используемых для перемещения жидкости от головки машины по рубашке охлаждения до источника охлаждающей жидкости. На базе разработанной схемы создана 3D-модель поршневой гибридной энергетической машины объемного действия с двумя всасывающими клапанами. Приведены результаты прочностных расчетов в программном пакете SolidWorks, которые показали, что возникающие напряжения не превышают допустимых значений для использованных типов материалов. Для исследования основных рабочих процессов и интегральных характеристик машины создан экспериментальный стенд, оснащенный необходимой измерительной аппаратурой.

EDN: SNOYLC, <https://elibrary/snoylc>**Ключевые слова:** поршневая гибридная энергетическая машина, два всасывающих клапана, опытный образец, экспериментальный стенд, измерительная аппаратура

Main disadvantages of a piston hybrid volumetric power machine with two suction valves were analyzed. Based on the analysis, a fundamentally new scheme of such a machine with cyclic supply of the compressed gas into the suction cavity was developed to provide the necessary surface forces used to move liquid from the machine head along the cooling jacket to the cooling liquid source. Using the developed scheme, a 3D model of the piston hybrid volumetric power machine with two suction valves was created. Strength computation was performed in the SolidWorks software package, which showed that the resulting stress was not exceeding permissible values for the types of materials used. An experimental bench equipped with the measurement equipment was developed to study the machine main working processes and integral characteristics.

EDN: SNOYLC, <https://elibrary/snoylc>**Keywords:** piston hybrid power machine, two suction valves, prototype, experimental bench, measurement equipment

Компрессоры и насосы являются самыми крупными потребителями вырабатываемой энергии. По разным оценкам, их доля в энергетическом

балансе потребляемой энергии может составлять 10...20 % [1, 2]. Среди многообразия таких машин поршневые компрессоры и насосы за-

нимают лидирующее положение, что заставляет исследователей создавать новые образцы машин, обладающих повышенной энергоэффективностью и малыми массогабаритными показателями.

В связи с этим на протяжении многих лет разрабатываются и исследуются поршневые гибридные энергетические машины объемного действия (ПГЭМОД), объединяющие в себе функции насоса и компрессора в одном агрегате.

К достоинствам ПГЭМОД можно отнести интенсивное охлаждение компримируемого газа и повышение эффективности сжатия жидкости за счет подвода утилизационной теплоты от компрессора. Причем если агрегат одновременно подает потребителям сжатый газ и жидкость под давлением, то повышение эффективности компрессора и насоса достигается практически без дополнительных энергетических затрат.

Среди ПГЭМОД можно выделить класс машин, в которых сжатие и перемещение газа и жидкости выполняет один поршень. К ним относятся и конструкции, предложенные в работах [3–6], защищенные патентами на изобретение РФ и прошедшие комплексные теоретические и экспериментальные исследования.

В первой конструкции [3] перемещение жидкости вверх осуществляется за счет разрежения на всасывании газа, а движение жидкости вниз — благодаря объемным силам. К недостаткам конструкции относится невысокая эффективность циркуляции жидкости в рубашке охлаждения вследствие незначительных объемных сил по сравнению с поверхностными.

Во второй конструкции [4] интенсификация в основном связана с использованием поверхностных сил. Эта машина имеет два цилиндра, в которых установлены поршни с углом развала 180° , что позволило организовать движение жидкости за счет создаваемого разрежения последовательно, то в одном цилиндре, то в другом. Результатами экспериментальных и теоретических исследований подтверждено, что машина хорошо охлаждалась и имела высокие индикаторный коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент подачи [7–9]. К недостаткам второй конструкции относится необходимость наличия двух поршней, смещенных относительно друг друга на 180° .

Для преодоления этого недостатка разработана конструкция одноступенчатой поршневой

гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами [10–12]. В ней движение жидкости как вверх, так и вниз по рубашке охлаждения осуществляется поверхностными силами. Это позволило интенсифицировать движение охлаждающей жидкости, улучшить охлаждение компримируемого газа, повысить индикаторный изотермический КПД и коэффициент подачи [13, 14].

Однако анализ рабочих процессов поршневой гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами выявил, что на сжатие газа, необходимого для организации поверхностных сил при движении жидкости вниз, затрачивается достаточно много энергии. Также существует рассогласование в амплитудно-частотных характеристиках, вынуждающей поверхностной силы и собственных частот колебания жидкости в системе охлаждения [15].

Цель статьи — разработка новой высокоэффективной ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами, обеспечивающей сокращение затрат на сжатие газа для организации поверхностных сил при движении жидкости вниз и приближающих частоту колебания вынуждающей силы к частоте движения охлаждающей жидкости.

Описание объекта исследования. На основе анализа указанных недостатков разработана новая принципиальная схема ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами (рис. 1).

Эта машина работает следующим образом. Предположим, что поршень 3 находится в нижней мертвой точке. Первый 7 и второй 9 всасывающие клапаны, а также нагнетательный клапан 10 закрыты, в полости всасывания 8 и рабочей полости давление равно номинальному давлению всасывания. При движении поршня вверх происходит сжатие газа в рабочей полости. Увеличение давления в рабочей полости приводит к тому, что сжатый газ из нее по каналу 4 начинает поступать в полость 8, повышая там давление.

При давлении выше давления всасывания жидкость под действием поверхностных и объемных сил начинает двигаться по рубашке охлаждения 5 через обратный клапан 12 к гидробаку 13. Подача сжатого газа в полость 8 по соответствующему каналу 4 осуществляется до тех пор, пока поршень не перекроет входное отверстие этого канала.

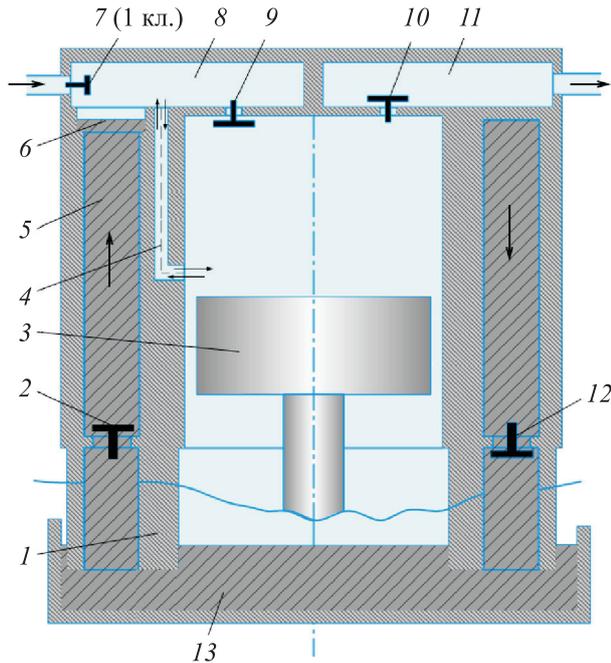


Рис. 1. Принципиальная схема одноцилиндровой ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами: 1 — цилиндр; 2, 12 — обратные клапаны; 3 — поршень; 4 — газовый канал; 5 — рубашка охлаждения; 6 — полость, частично заполненная жидкостью; 7 и 9 — первый и второй всасывающие клапаны; 8 и 11 — полости всасывания и нагнетания; 10 — нагнетательный клапан; 13 — гидробак

При дальнейшем движении поршня подача сжатого газа по каналу 4 прекращается, давление в рабочей полости достигает давления нагнетания, нагнетательный клапан открывается, и газ из рабочей полости поступает в полость нагнетания 11, а затем к потребителю. После отсечения канала 4 от рабочей полости давление в полости 8 уменьшается за счет опускания охлаждающей жидкости к источнику по рубашке. Объем газа в этой полости увеличивается, а уровень охлаждающей жидкости уменьшается.

После окончания процесса нагнетания поршень начинает перемещаться вниз, увеличивая объем рабочей полости. В ней падает давление, что приводит к открытию второго всасывающего клапана 9 и поступлению газа из полости 8 в рабочую полость. Давление в полости 6 уменьшается ниже номинального давления всасывания, первый всасывающий клапан 7 открывается, и газ из атмосферы начинает поступать в полость 8.

Вследствие того, что в рабочей полости и полости 8 в процессе всасывания создается разрежение, жидкость от гидробака 13 через обратный клапан 2 начинает поступать в рубашку

охлаждения 5 и полость 6, которая соединена с полостью 8, а уровень жидкости в полости 6 начинает повышаться.

После того, как поршень откроет канал 4, газ из полости 8 поступает в рабочую полость не только через клапан 9, но и через этот канал, увеличивая массу газа в рабочей полости, что приведет к возрастанию коэффициента подачи компрессора. В дальнейшем цикл повторяется.

Следует отметить, что газ поступает из рабочей полости в полость 8 под низким давлением. Это уменьшает затраты на его сжатие по сравнению с таковыми для предыдущей конструкции.

Пневмогидравлическая схема разработанного экспериментального стенда для исследования модернизированной ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами приведена на рис. 2. Она почти не изменилась по сравнению со схемой, описанной в работе [16]. Модернизированная ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами создана на основе серийно выпускаемой установки QE AERO-16. Эта машина является одноступенчатым одноцилиндровым поршневым компрессором малой производительности для сжатия газа до низких и средних давлений.

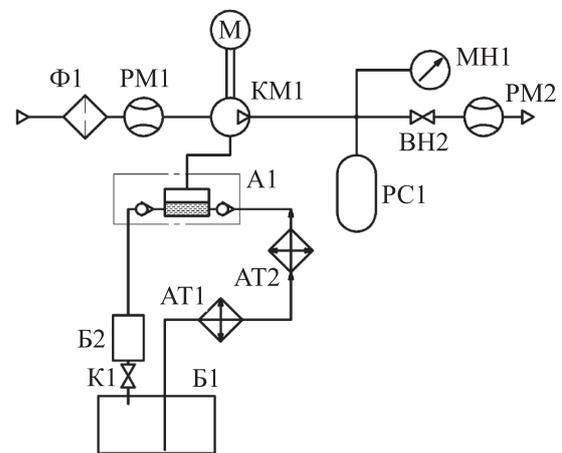


Рис. 2. Пневмогидравлическая схема экспериментального стенда для исследования модернизированной ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами: Ф1 — фильтр всасываемого газа; РМ1 и РМ2 — расходомеры всасываемого и нагнетаемого газов; М — мотор; КМ1 — поршневая гибридная энергетическая машина; РС1 — ресивер сжатого газа; МН1 — манометр для измерения давления нагнетания сжатого газа; ВН2 — регулирующий вентиль; А1 — клапанный блок с обратными клапанами 2 и 12 (см. рис. 1); Б2 — мерная емкость; К1 — сливной кран; Б1 — гидробак 13 (см. рис. 1); АТ1 — теплообменный аппарат для охлаждения жидкости; АТ2 — рубашка охлаждения 5 поршневого компрессора (см. рис. 1)

Аналогичные компрессоры широко распространены в быту и на малых предприятиях, их количество измеряется миллионами штук, а их модернизация, позволяющая повысить индикаторный изотермический КПД за счет жидкостного охлаждения на 3...5 % приведет к существенному снижению энергопотребления.

Модернизированная ПГЭМОД имеет следующие основные геометрические параметры: диаметр поршня — 0,047 м; ход поршня — 0,038 м; относительный мертвый объем — 10,52 %; диаметр внешней поверхности цилиндра — 0,07 м; диаметр внутренней поверхности рубашечного пространства — 0,08 м; длина подводящего трубопровода жидкости — 0,2 м; полная высота рубашки охлаждения — 0,06 м; диаметр подводящего жидкостного трубопровода — 0,008 м; ширина прохода в седле всасывающего и нагнетательного клапанов — 0,0128 м; максимальная высота подъема запорного органа нагнетательного и всасывающего клапанов — 0,0008 м; жесткость пружины нагнетательного и всасывающего клапанов — 4233 Н/м; число клапанов на всасывании и нагнетании — 1; масса запорного органа всасывающего и нагнетательного клапанов — $1,5 \cdot 10^{-3}$ кг.

При разработке модернизированной ПГЭМОД канал 4 (см. рис. 1) заменили трубопроводом, который выходит из рабочей поло-

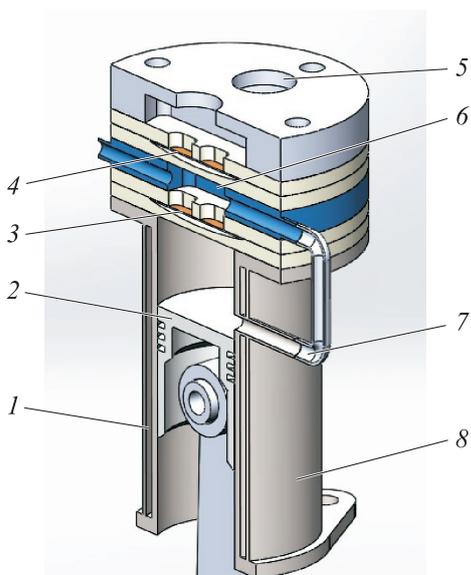


Рис. 3. 3D-модель (в разрезе) модернизированной ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами: 1 — рубашка охлаждения; 2 — поршень; 3 и 4 — второй и первый всасывающие клапаны; 5 и 6 — полости нагнетания и всасывания; 7 — газовый канал; 8 — цилиндр

сти и поступает в полость всасывания 6 (рис. 3). Диаметр трубопровода равен 3 мм, а вход в него расположен на расстоянии 2/3 полного хода от верхней мертвой точки (0,02546 м).

При разработке конструкции выполнен расчет на прочность основных деталей и узлов ПГЭМОД в программном пакете SolidWorks. Полученные результаты позволили установить, что при давлении нагнетания, равном 0,1 МПа, все узлы и детали цилиндропоршневой группы работают с достаточным запасом прочности.

Методика измерения основных исследуемых параметров. Внешний вид экспериментального стенда с измерительной аппаратурой и модернизированной ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами приведен на рис. 4 и 5.

В ходе эксперимента измеряли следующие параметры: статическое давление в линии нагнетания, мгновенное давление в рабочей полости, температуру газа на всасывании и нагнета-

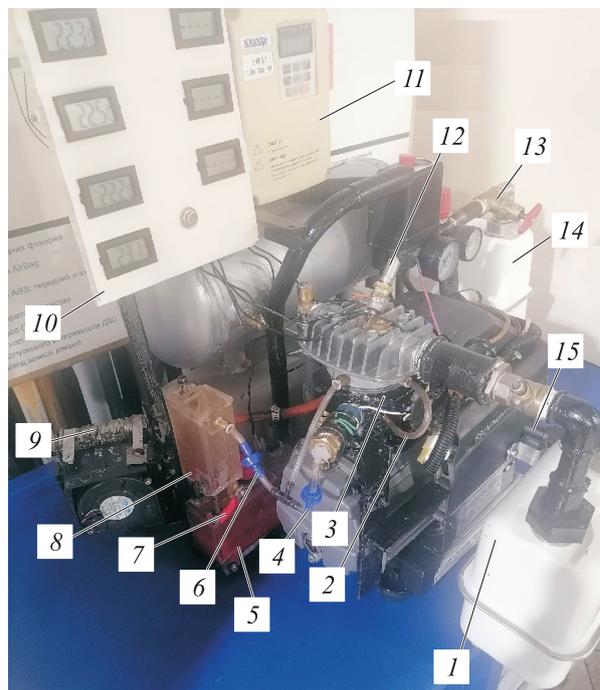


Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда с измерительной аппаратурой: 1 — расходомер газа на линии всасывания; 2 — газовый канал; 3 — цилиндр; 4, 6 — обратные жидкостные клапаны; 5 — гидробак; 7 — сливной кран между баками; 8 — мерная емкость; 9 — радиатор с вентилятором; 10 — табло с показателями температуры; 11 — частотный преобразователь; 12 — датчик давления в рабочей полости компрессора; 13 — кран на линии нагнетания компрессора; 14 — расходомер газа на линии нагнетания; 15 — датчик положения коленчатого вала компрессора



Рис. 5. Фрагмент экспериментального стенда с организацией подачи газа из рабочей полости в полость всасывания (1 — газовый канал)

нии, температуру деталей цилиндропоршневой группы, расход газа на всасывании и нагнетании, расход и температуру охлаждающей жидкости.

Измерение статического давления в линии нагнетания. На протяжении многих лет статическое давление измеряют манометрами, построенными на основе трубки Бурдона. Эти манометры надежны и обеспечивают достаточную точность измеряемого давления.

Для экспериментального исследования выбран радиальный манометр Fimet (Италия) с максимальной погрешностью 1,5 % со следующими характеристиками: диаметр — 63 мм; резьбовое соединение — 1/4"; максимальное давление — 1,2 МПа.

Измерение мгновенного давления. Самыми распространенными приборами для измерения этого параметра являются датчики давления, использующие пьезокерамический элемент или тензорезистор [17].

При экспериментальном исследовании на поверхность чувствительного элемента, де-

формация которого будет находиться в упругой области, наклеивали полупроводниковые тензорезисторы, соединенные в мостовую схему. С увеличением давления происходит деформация чувствительного элемента, а следовательно, и тензорезисторов, что приводит к изменению их электрического сопротивления, причем это изменение пропорционально давлению.

Мгновенное давление измеряли тензодатчиками PSE530-M5-1 с погрешностью менее 2 %. Для регистрации сигналов с датчиков давления использовали АЦП ZET230 с возможностью работы с четырьмя датчиками одновременно.

Измерение стационарных температур. Для измерения стационарных температур применяют датчики, основанные на различных физических явлениях. Благодаря линейной характеристике, точности и простоте использования наибольшее распространение получили термисторы, сопротивление которых изменяется в зависимости от температуры.

В экспериментальном стенде использовали термисторы фирмы Epcos. В линии всасывания и нагнетания газа измерение температуры проводили с помощью датчиков температур B57861-S 103-F40. Температуру деталей цилиндропоршневой группы измеряли датчиками KPD/MF5A-682H-398H-G, погрешность измерения которых составляет не более 1 %, а диапазон рабочей температуры находится в диапазоне от -55 до 155 °С.

Измерение частоты вращения приводного вала. Число оборотов коленчатого вала оказывает существенное влияние на коэффициент подачи и индикаторный изотермический КПД, поэтому точность его измерения представляет собой важную задачу. Для измерения числа оборотов валов используют различные механические, электромагнитные, оптические и стробоскопические датчики.

В экспериментальном стенде использовали электромагнитный датчик, обеспечивающий фиксацию положения поршня в верхней мертвой точке. При прохождении постоянного магнита, расположенного на шкиве компрессора катушки индуктивности, происходит изменение магнитного поля, что вызывает ток самоиндукции, который фиксируется аналогоцифровым преобразователем.

Измерение расхода жидкости в системе охлаждения. В настоящее время наибольшее распространение получили электромагнитные, ультразвуковые, тахометрические, вихревые, механические, оптические и тепловые расходомеры [18]. Однако при измерении нестационарного расхода жидкости указанные датчики могут давать значительные погрешности.

В связи с этим для измерения нестационарного расхода жидкости в исследуемой машине использовали объемный метод, для чего создали емкость объемом 50 мл, время заполнения которой фиксировали с помощью электронного секундомера с погрешностью 0,01 с. Чтобы более точно измерять объем жидкости в мерной емкости, ее опорожняли шприцем с ценой деления 1 мл, вследствие чего погрешность измерения не превышала 1 %.

Измерение расхода газа. После предварительной оценки производительности ПГЭМОД по сжимаемому газу установлено, что его расход будет составлять 80...100 л/мин, что позволило подобрать прибор для измерения компримируемого газа.

Анализ приборов по стоимости, надежности и погрешности показал, что на нагнетании газа целесообразнее использовать газовый счетчик СГВ-15 «Бетар» с погрешностью измерения не более 1,5 %, а на всасывании газа — диафрагменный газовый счетчик «Вектор G4» с погрешностью измерения не более 3 %.

Измерение потребляемой мощности электродвигателя. Для измерения потребляемой мощности электродвигателя выбрали датчик, измеряющий вольтамперную характеристику. Экс-

перимент проводили с применением токовых клещей EM402 (погрешность менее 2 %).

Выводы

1. Предложена принципиально новая схема ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами и циклической подачей сжимаемого газа в полость всасывания для организации необходимых поверхностных сил, используемых для перемещения жидкости от головки машины по рубашке охлаждения до источника охлаждающей жидкости.

2. На основе предложенной схемы разработана 3D-модель ПГЭМОД с двумя всасывающими клапанами. Проведены прочностные расчеты в программном пакете SolidWorks, которые показали, что возникающие напряжения не превышают допустимые значения для использованных типов материалов.

3. Для исследования основных рабочих процессов и интегральных характеристик данной машины разработан экспериментальный стенд. Он позволяет измерять мгновенное и стационарное давления компримируемого газа, расход и температуру газа в линии нагнетания и всасывания, температуру деталей цилиндропоршневой группы, расход охлаждающей жидкости, число оборотов коленчатого вала и мощность, потребляемую электродвигателем.

4. Созданный опытный образец и экспериментальный стенд для его исследования позволяют получать новые знания о протекающих рабочих процессах в гибридных энергетических машинах. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для верификации разработанной математической модели.

Литература

- [1] Хиненгер Т., Шмидт-Фоллус Р., Норден М. Оптимизация процессов за счет самонастройки в насосных системах — одна из возможностей повышения эффективности. *Насосы, компрессоры, арматура*, 2017, № 8, с. 4–10.
- [2] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры*. Т. 1. *Теория и расчет*. Москва, Колос, 2006. 456 с.
- [3] Болштянский А.П., Щерба В.Е., Кайгородов С.Ю. и др. *Поршневой компрессор с автономным жидкостным охлаждением*. Патент РФ 2578748. Заявл. 19.02.2015, опубл. 27.03.2016.
- [4] Щерба В.Е., Орех Д.В., Болштянский А.П. и др. *Поршневой двухцилиндровый компрессор с автономным жидкостным рубашечным охлаждением*. Патент РФ 2754489. Заявл. 18.12.2020, опубл. 02.09.2021.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-62-72>
- [8] 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://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-40-49>
- [9] Shcherba V.E., Khait A., Pavlyuchenko E.A. et al. Development and research of a promising pumpless liquid cooling system for reciprocating compressors. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 3, art. 1191, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031191>
- [10] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S., Zaloznov I.P. et al. Experimental study of the influence of the crankshaft rotational speed on the working processes of a piston-type positive displacement hybrid power machine with two suction valves. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 403–411, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-024-01256-2>
- [11] Tegzhanov A.S., Shcherba V.E., Dorofeev E.A. et al. Experimental study of the characteristics of a piston-type machine with positive-displacement hybrid power and two suction valves using various coolants. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 412–418, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-024-01257-1>
- [12] Щерба В.Е., Тегжанов А.С. Анализ влияния объема мертвого пространства на рабочие процессы и характеристики поршневой гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2023, № 7, с. 31–35.
- [13] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S. Analysis of the dynamics of coolant movement and working processes in a piston hybrid positive displacement energy machine with a gas dome and two suction valves with injection pressure variation. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 7–8, pp. 658–668, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01144-1>
- [14] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S. Analysis of dynamics and integral characteristics of a reciprocating hybrid energy machine with two suction valves when changing the rotational speed of the crankshaft. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 7–8, pp. 669–676, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01145-0>
- [15] Екимов Г.И., Тегжанов А.С., Щерба В.Е. Анализ основных недостатков поршневой гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами и пути их преодоления. *Гидравлические и теплотехнические системы и агрегаты. XXVII Межд. науч.-тех. конф.* Москва, Мир науки, 2023, с. 79–85.
- [16] Shcherba V.E., Tegzhanov A.Kh.-S., Ekimov G.I. Development of a prototype positive displacement piston hybrid power machine with two suction valves and a facility for its testing. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 1–2, pp. 144–152, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01220-6>
- [17] Кулебякин В.В. *Методы и приборы для измерения давления*. Минск, БНТУ, 2015. 36 с.
- [18] Кремлевский П.П. *Расходомеры и счетчики количества веществ*. Кн. 1. Санкт-Петербург, Политехника, 2002. 409 с.

References

- [1] Khinenger T., Shmidt-Follus R., Norden M. Process optimization through self-tuning in pumping systems — one of the possibilities to increase efficiency. *Nasosy, kompressory, armatura*, 2017, no. 8, pp. 4–10. (In Russ.).
- [2] Plastinin P.I. *Porshnevyye kompressory*. Т. 1. *Teoriya i raschet* [Piston compressors. Т. 1. Theory and calculation]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).

- [3] Bolshtyanskiy A.P., Shcherba V.E., Kaygorodov S.Yu. et al. *Porshnevoy kompressor s avtonomnym zhidkostnym okhlazhdeniem* [Piston compressor with independent liquid cooling]. Patent RU 2578748. Appl. 19.02.2015, publ. 27.03.2016. (In Russ.).
- [4] Shcherba V.E., Orekh D.V., Bolshtyanskiy A.P. et al. *Porshnevoy dvukhtsilindrovyy kompressor s avtonomnym zhidkostnym rubashechnym okhlazhdeniem* [Reciprocating two-cylinder compressor with autonomous liquid jacket cooling]. Patent RU 2754489. Appl. 18.12.2020, publ. 02.09.2021. (In Russ.).
- [5] Shcherba V.E., Ovsyannikov A.Yu., Bolshtyanskiy A.P. et al. *Porshnevoy dvukhtsilindrovyy 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.).
- [6] 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.).
- [7] 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. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 11, pp. 62–72, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-11-62-72> (in Russ.).
- [8] 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. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 12, pp. 40–49, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-12-40-49> (in Russ.).
- [9] Shcherba V.E., Khait A., Pavlyuchenko E.A. et al. Development and research of a promising pumpless liquid cooling system for reciprocating compressors. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 3, art. 1191, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031191>
- [10] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S., Zaloznov I.P. et al. Experimental study of the influence of the crankshaft rotational speed on the working processes of a piston-type positive displacement hybrid power machine with two suction valves. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 403–411, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-024-01256-2>
- [11] Tegzhanov A.S., Shcherba V.E., Dorofeev E.A. et al. Experimental study of the characteristics of a piston-type machine with positive-displacement hybrid power and two suction valves using various coolants. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 5–6, pp. 412–418, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-024-01257-1>
- [12] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S. Influence of the dead space volume on the working processes and performance of a piston hybrid power machine with two suction valves. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2023, no. 7, pp. 31–35. (In Russ.).
- [13] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S. Analysis of the dynamics of coolant movement and working processes in a piston hybrid positive displacement energy machine with a gas dome and two suction valves with injection pressure variation. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 7–8, pp. 658–668, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01144-1>
- [14] Shcherba V.E., Tegzhanov A.S. Analysis of dynamics and integral characteristics of a reciprocating hybrid energy machine with two suction valves when changing the rotational speed of the crankshaft. *Chem. Petrol. Eng.*, 2022, vol. 58, no. 7–8, pp. 669–676, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01145-0>
- [15] Ekimov G.I., Tegzhanov A.S., Shcherba V.E. [Analysis of the main disadvantages of piston hybrid power machine with two intake valves and ways to overcome them]. *Gidravlicheskie i teplotekhnicheskie sistemy i agregaty. XXVII Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Hydraulic and thermal engineering systems and units. XXVII Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Mir nauki Publ., 2023, pp. 79–85. (In Russ.).
- [16] Shcherba V.E., Tegzhanov A.Kh.-S., Ekimov G.I. Development of a prototype positive displacement piston hybrid power machine with two suction valves and a facility for its testing. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 1–2, pp. 144–152, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01220-6>

- [17] Kulebyakin V.V. *Metody i pribory dlya izmereniya davleniya* [Methods and devices for pressure measurement]. Minsk, BNTU Publ., 2015. 36 p. (In Russ.).
- [18] Kremlevskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv*. Kn. 1 [Flowmeters and counters of the quantity of substances. Vol. 1]. Sankt-Petersburg, Politekhnik Publ., 2002. 409 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.04.2024

Информация об авторах

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

ТЕГЖАНОВ Аблай-Хан Савитович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: ablai1991@mail.ru).

ЕКИМОВ Геннадий Игоревич — аспирант, ассистент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: genaekimov55rus@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Щерба В.Е., Тегжанов А.С., Екимов Г.И. Разработка и исследование высокоэффективной поршневой гибридной энергетической машины с двумя всасывающими клапанами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 74–82.

Please cite this article in English as:

Shcherba V.E., Tegzhanov A.S., Ekimov G.I. Research and development of a high-efficiency piston hybrid power machine with two suction valves. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 74–82.

Information about the authors

SHCHERBA Viktor Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Professor, Head of Hydromechanics and Transport Vehicles Department. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

TEGZHANOV Ablai-Khan Savitovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor Head of Hydromechanics and Transport Vehicles Department. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: ablai1991@mail.ru).

EKIMOV Gennady Igorevich — Postgraduate, Assistant, Head of Hydromechanics and Transport Vehicles Department. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: genaekimov55rus@gmail.com).