

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УПЛОТНЕНИЙ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН

Е. А. Павлюченко, А. С. Тегжанов, В. Е. Щерба, Е. А. Лысенко, А. К. Кужбанов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье рассмотрены основные методы расчета уплотнений гибридных энергетических машин. Проведен анализ работ по конструкциям гибридных энергетических машин. Рассмотрены основные виды поршневых уплотнений насосов, компрессоров и гибридных энергетических машин с акцентированием внимания на основные преимущества и недостатки каждого вида уплотнения, а также даны рекомендации по выбору уплотнений для гибридных энергетических машин. На основе анализа работ по исследованиям поршневых уплотнений рассмотрены основные методы расчета уплотнений гибридных энергетических машин и определен наиболее подходящий. Ключевые слова: уплотнения, гибридные машины, энергетические машины, ступенчатые уплотнения, щелевые уплотнения, уплотнение в виде гидродиода.

Введение

В настоящее время существует тенденция, направленная на эффективное использование энергии в различных бытовых и промышленных установках.

Затраты энергии при производстве сжатого воздуха на промышленных предприятиях могут составлять больше половины всех затрат. Для типичного промышленного объекта в России примерно 10 % потребляемой электроэнергии приходится на производство сжатого воздуха. Для некоторых объектов на сжатый воздух приходится более 30 % потребляемой электроэнергии [1, 2]. Затраты на электроэнергию в течение всего жизненного периода использования компрессора могут составлять более 75 % от общей стоимости. Повышение энергоэффективности систем сжатого воздуха может привести к экономии энергии до 20–50 % [3, 4]. Как известно, поршневые компрессоры широко используются для получения энергии сжатого газа в различных отраслях промышленности и занимают лидирующее положение среди компрессоров объемного действия по величине потребляемой энергии [5], в связи с чем совершенствование рабочих процессов поршневых компрессоров с целью повышения эффективности их работы является актуальной задачей.

Одним из кардинальных путей повышения экономичности и эффективности работы поршневых машин, а также улучшения их массогабаритных показателей является объединение насосов и компрессоров в единый агрегат, получивший название «поршневая гибридная энергетическая машина объемного действия» (ПГЭМОД) [6].

В последнее время было проведено много исследований в области проектирования ПГЭМОД [7–9]. Авторы работ [10, 11] провели анализ конструкций ПГЭМОД, который показал, что большинство ПГЭМОД на ряду с неоспоримыми преимуществами обладает рядом недостатков, а именно имеют сложную конструкцию, низкую трудоёмкость изготовления, сложны в эксплуатации, имеют высокую

себестоимость изготовления и др. Ввиду этого появляется необходимость в создании новой машины, которая будет иметь: простую конструкцию, низкую себестоимость изготовления, высокую интенсивность охлаждения и чистоту газа, выходящего из компрессорной полости. Учитывая вышеперечисленное, авторы в работе [12] предложили конструкцию поршневой гибридной энергетической машины с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане. На рис. 1 схематично показан ПГЭМОД с последовательно размещенными основной и дополнительной полостями всасывания. Предложенная конструкция компрессора с жидкостным автономным рубашечным охлаждением имеет существенно более простую структуру, что обеспечивает снижение массогабаритных параметров. Гидравлическая схема конструкции не требует применения высокочувствительных компонентов, что значительно снижает стоимость изготовления.

ПГЭМОД, показанный на рис. 1, состоит из рабочей полости 1 цилиндра 2, полости всасывания 3 и полости нагнетания 4, в которых установлены обратные самодействующие клапана 5 и 6. ПГЭМОД имеет жидкостную рубашку охлаждения 7 и отдельную емкость 8 для охлаждающей жидкости. Емкость 8 частично заполняется водой. Емкость 8 соединяется каналами 9 и 10, в которых установлены обратные самодействующие клапаны 11 и 12, с рубашкой охлаждения 7. Верхняя часть рубашки охлаждения 13 через отверстие 14 соединена с дополнительной полостью всасывания 15, которая размещается последовательно полости всасывания 3. Обратный самодействующий клапан 16 размещается в полости 15. Дроссельное отверстие 17, размещенное в теле клапана 5, соединяет дополнительную полость 15 через полость 3 с рабочей полостью 1 цилиндра 2. В цилиндре 2 совершает возвратно-поступательное движение поршень 18, канал 10 содержит теплообменник 19. Рабочее вещество (газ) поступает к компрессору по линии всасывания 20 и нагнетается по линии нагнетания 21 потребителю.

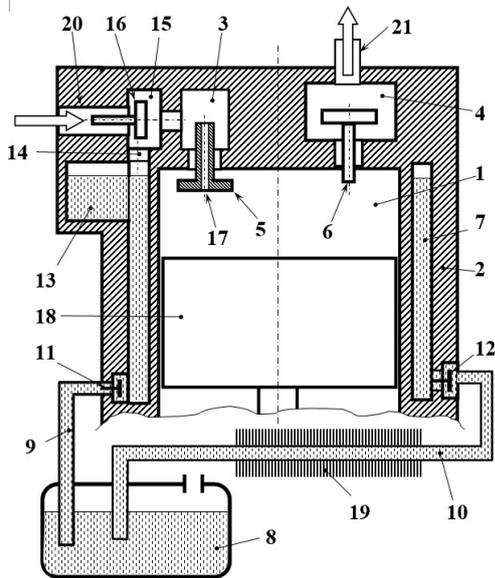


Рис. 1. Конструкция поршневой гибридной энергетической машины с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане
 Fig. 1. The design of a reciprocating hybrid energy machine with a gas volume with fluid motion due to a leak in the suction valve

В данной конструкции используется жидкостное охлаждение, а в качестве рабочей жидкости может применяться антифриз или вода. В системе смазки компрессора используется синтетическое или минеральное масло. В нормально работающей машине попадание охлаждающей жидкости в рабочую камеру не происходит, однако при работе на не расчетных режимах жидкость может попадать в рабочую камеру компрессора через всасывающий клапан. В процессе сжатия компримируемый газ с охлаждающей жидкостью через нагнетательный клапан поступает на влагоотделитель, где охлаждающая жидкость отделяется от газа и далее она опять подается в систему охлаждения.

Наличие охлаждающей жидкости в рабочей камере компрессора предусматривает в конструкции машины установку надежных уплотнительных элементов, так как от качества уплотнений зависит работоспособность всей конструкции, поскольку попадание охлаждающей жидкости в систему смазки в картере недопустимо.

Для качественного выбора уплотнения поршня ПГЭМОД с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане необходимо на начальных этапах проектирования машины провести анализ существующих уплотнений и рассмотреть методы их расчета.

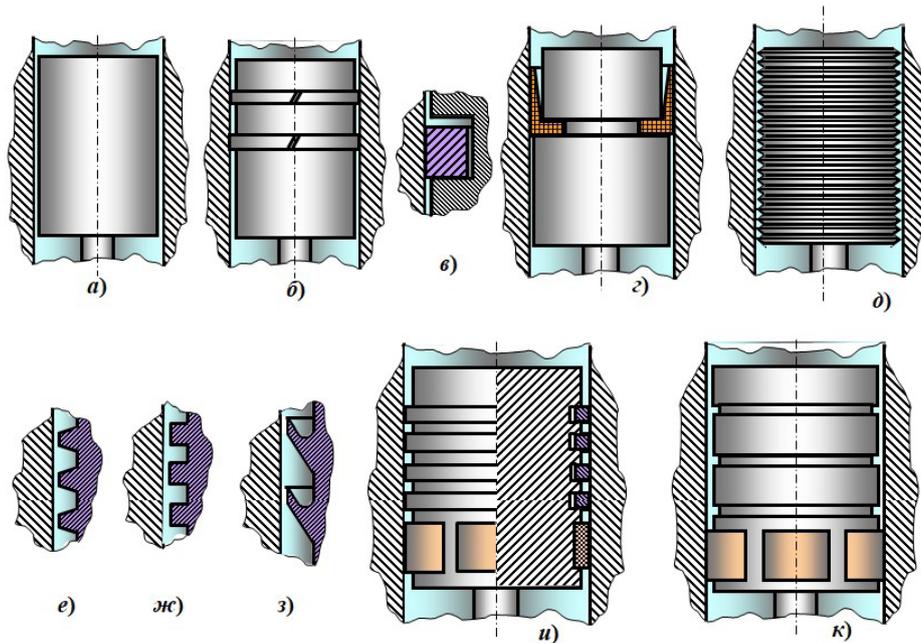


Рис. 2. Конструкции уплотнений в цилиндропоршневых группах компрессоров и насосов: а — гладкое щелевое уплотнение; б — кольцевое уплотнение; в — сечение разрезного поршневого кольца прямоугольной формы; г — манжетное уплотнение; д — лабиринтное уплотнение с треугольным профилем лабиринта; е — трапецидальный профиль лабиринтного уплотнения; ж — прямоугольный профиль лабиринтного уплотнения; з — наклонный профиль лабиринтного уплотнения; и — лабиринтно-щелевое уплотнение с направляющими поршень башмаками; к — щелевое уплотнение поршня, имеющего направляющие башмаки и радиальные канавки для сбора продуктов износа направляющих башмаков
 Fig. 2. Designs of seals in cylinder-piston groups of compressors and pumps: а — smooth slot seal; б — annular seal; в — section of a rectangular split piston ring; г — cuff seal; д — labyrinth seal with a triangular profile of the labyrinth; е — trapezoidal profile of the labyrinth seal; ж — rectangular profile of the labyrinth seal; з — inclined profile of the labyrinth seal; и — labyrinth-slot seal with piston guide shoes; к — slot seal of a piston having guide shoes and radial grooves for collecting wear products of guide shoes

В зависимости от назначения и производительности в насосах и компрессорах, а также в ПГЭМОД применяются два типа уплотнений — контактные и бесконтактные [13–15]. Традиционные способы контактных уплотнений включают поршневые и манжетные кольца, а бесконтактные бывают гладкие щелевые, лабиринтные, лабиринтно-щелевые. Основные конструкции уплотнений в цилиндропоршневых группах компрессоров, насосов и ПГЭМОД показаны на рис. 2.

Анализ конструкций компрессоров, насосов и ПГЭМОД показал, что наиболее широкое применение получили контактные кольцевые уплотнения с разрезными кольцами, которые могут изготавливаться из качественного перлитного чугуна, стали, реже — сплавов цветных металлов (рис. 2б и рис. 2в). Работа таких уплотнений основана на распирающей газовой силе и силе собственной упругости [13]. Если такие уплотнения изготавливаются с использованием текстолита, композитов на основе фторопласта и других неупругих материалов, то дополнительно изнутри кольца для усиления упругости устанавливаются пружинные экспандеры. Уплотнения этого типа применяются в компрессорах для получения чистых сжатых газов.

Если требуется максимально герметизировать рабочую камеру компрессора или насоса, то используются манжетные уплотнения (рис. 2г) [16]. Манжеты могут изготавливаться из кожи или фибры, а также из акрилонитрилбутадиенового каучука (АБС-пластик или NBR), армированные тканями материалами. Манжетные уплотнения имеют относительно большой износ и, как следствие, малый ресурс работы, поскольку работают в области повышенного трения. Армирование тканями материалами и установка изнутри манжеты распорных пружин позволяет предотвратить выдавливание уплотнения и снизить износ.

Бесконтактные уплотнения имеют преимущества перед контактными: более простая конструкция, меньшие потери на трение и более легкий подход к обработке поверхности самосмазывающихся материалов.

На рис. 2д представлена одна из конструкций бесконтактного уплотнения — лабиринтного уплотнения. Лабиринтные уплотнения используются в насосах, где необходимо перекачивать агрессивные среды, а также в компрессорах для получения чистых газов под давлением без их загрязнения [15, 17]. Как установлено авторами работ [18–20], в лабиринтных уплотнениях утечки мало зависят от формы выступов (рис. 2е, ж, з), а определяются величиной зазора между уплотнением и поверхностью цилиндра. Количество выступов также влияет на величину утечек — чем их больше, тем герметичней уплотнение. Авторы показали, что при радиальных зазорах от 20 до 70 мкм утечки газа через лабиринтное уплотнение практически совпадают с утечками через гладкое щелевое уплотнение, изображенное на рис. 2а.

Лабиринтно-щелевое уплотнение (рис. 2и) является компромиссным решением между обычным поршневым, лабиринтным и щелевым уплотнением. В нем вдоль образующей поршня установлены «плавающие» в радиальном направлении кольца, которые вместе с поверхностью поршня образуют лабиринт для утечек и перетечек. Устанавливаемые кольца имеют больший диаметр, чем сам

цилиндр, и прирабатываются в процессе обкатки. По мере износа башмаков или других направляющих устройств кольца «отслеживают» возникшие поперечные колебания поршня, сохраняя практически первоначальную герметичность.

Анализ конструкций поршневых уплотнений показал, что предпочтительней для ПГЭМОД являются бесконтактные уплотнения. Данные уплотнения имеют минимальные потери энергии на трения и пониженный износ. Однако бесконтактные уплотнения не обеспечивают полной герметизации рабочей камеры ПГЭМОД, что в условиях работы машины с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане недопустимо. Полную герметизацию обеспечивают манжетные кольца, но они имеют ограничения по ресурсу и максимальные потери энергии на трения в сравнении с другими типами уплотнений. Поэтому в качестве основного уплотнения для ПГЭМОД с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане следует выбрать контактные кольцевые уплотнения с разрезными кольцами. Они обеспечивают приемлемую герметичность рабочей камеры, имеют повышенный ресурс и небольшие потери на трения. В работе [21] показано, что потери мощности компрессора на контактные кольцевые уплотнения могут достигать до 6%. Следует отметить, что применение контактного уплотнения в компрессоре позволяет отводить часть тепла от поршня к стенкам цилиндра, что положительно сказывается на эффективности работы машины.

Анализ работ по расчёту уплотнений показал, что экспериментальные исследования дают более точную картину процессов, происходящих в уплотнениях, и более точные результаты, но эксперименты всегда требуют значительных денежных затрат, хорошего измерительного оборудования, а в некоторых случаях трудновыполнимы. Кроме того, для проведения экспериментальных исследований необходимо иметь готовый опытный образец, следовательно, на начальном этапе проектирования любой машины необходимо использовать существующие методы проектирования и расчета.

Для анализа рабочих процессов и расчета поршневых контактных кольцевых уплотнений с разрезными кольцами были проведены многочисленные исследования. Авторы работы [22] экспериментально исследовали уплотняющую способность поршневых колец в поршневых компрессорах и выявили распределение давления между поршневыми кольцами. Они обнаружили, что на первое кольцо приходится более 75 % общей разницы давлений. В работе [23] авторы создали математическую модель для моделирования нестационарного течения в зазорах поршневых колец и предложили метод выравнивания перепада давления через каждое кольцо путем перераспределения размера разреза каждого кольца. Авторы [24] провели численное гидродинамическое исследование течения газа и масла в поршневых кольцах двигателя внутреннего сгорания. По результатам исследования были получены новые знания по рабочим процессам в поршневых кольцах и предложены методики расчета. По результатам проведенных исследований авторами работы [25] были разработаны подмодели для расчета разницы давлений между поршневыми кольцами, в которых учитывались поток газа через поршневые кольца, поток масла, закручивание кольца и осевое движение кольца в поршневых канав-

ках. В работе [26] авторы построили испытательную установку и трехмерную модель теплопередачи, чтобы проанализировать динамическую температуру уплотнительных колец в безмасляном поршневом компрессоре. По результатам работы было установлено, что степень повышения давления оказывает значительное влияние на осевое распределение температуры. Авторы работы [27] представили модель полугерметичного поршневого компрессора для сжатия CO_2 , в которой учитывались утечки и потери мощности на трение поршневых колец, чтобы выявить их влияние на производительность компрессора.

В статье [28] авторами рассмотрен расчет течения вязкой несжимаемой жидкости в поршневых уплотнениях поршневых гибридных энергетических машин в коммерческой программе ANSYS. Исходя из результатов, было предложено для расчета поршневых уплотнений гибридных энергетических машин использовать модель турбулентности RSM как наиболее точно определяющую скорость, расход и физическую картину течения в уплотнениях.

Проведенный анализ работ по исследованию и расчету поршневых контактных кольцевых уплотнений показал, что нахождение распределений давления для конструкций сложной формы, которой является поршневое уплотнение, приводит к необходимости использования в расчетах известных численных методов и, в частности, метода конечных элементов.

Метод конечных элементов является доминирующим численным методом для решения большинства инженерных задач, поскольку на его основе было разработано несколько доступных популярных коммерческих программ, таких как ABAQUS, ANSYS, Fluent, CFX, STAR-CD и т.д. В настоящее время многие исследования, использующие конечно-элементный анализ, выполняются с использованием коммерческого программного комплекса ANSYS. Это универсальная программа, которая позволяет решать стационарные и нестационарные пространственные задачи гидрогазодинамики. Сочетание эксперимента и ANSYS стало основным методом исследования и расчета различных уплотнений и, в частности, поршневых контактных кольцевых уплотнений с разрезными кольцами для ПГЭМОД.

Результаты

По результатам проведенного анализа работ по типам уплотнений и методов их расчета, применительно к уплотнению поршня ПГЭМОД с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане, можно сделать следующие выводы:

— в качестве основного уплотнения для ПГЭМОД с газовым объемом с движением жидкости за счет неплотности во всасывающем клапане следует выбирать контактные кольцевые уплотнения с разрезными кольцами. Они обеспечат хорошую герметичность рабочей камеры с относительно небольшими потерями на трения и повышенным ресурсом;

— для уплотнения высокого давления в ПГЭМОД рекомендуется увеличить количество кольцевых уплотнений, однако это приведет к повышенным потерям на трение и увеличенному износу, так как работа большей части уплотнений будет

происходить без смазки. Пластиковые кольца могут демонстрировать лучшие уплотняющие характеристики, а также характеристики трения и износа, чем металлические кольца, но материал из пластика сильно повреждается под высоким давлением и температурой;

— для расчета контактных кольцевых уплотнений с разрезными кольцами используется универсальный программный комплекс ANSYS или его аналоги.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта МК-4256.2022.4

Список источников

1. Mousavi S., Kara S., Kornfeld B. Energy Efficiency of Compressed Air Systems // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 15. P. 313–318. DOI: 0.1016/j.procir.2014.06.026.
2. Patil V. C., Acharya P., Ro P. I. Experimental investigation of heat transfer in liquid piston compressor // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 146. P. 169–179. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.121.
3. Shcherba V. E., Pavlyuchenko E. A., Nosov E. Yu., Bulgakova I. Yu. Approximation of the compression process to isothermal in a reciprocating compressor with a liquid piston // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 207. 118151. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118151.
4. Mousavi S., Kara S., Kornfeld B. Energy efficiency of compressed air systems // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 15 (4). P. 313–318. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.026.
5. Щерба В. Е. Рабочие процессы компрессоров объемного действия. Москва: Наука, 2008. 319 с.
6. Щерба В. Е., Болштянский А. П., Кайгородов С. Ю., Кузеева Д. А. Анализ основных преимуществ объединения компрессоров и насосов объемного действия в единый агрегат // *Вестник машиностроения*. 2015. № 12. С. 15–19.
7. Щерба В. Е., Болштянский А. П., Шалай В. В., Ходорева А. В. Насос-компрессоры. Рабочие процессы и основы проектирования. Москва: Машиностроение, 2013. 388 с.
8. Щерба В. Е., Носов Е. Ю., Тегжанов А. С., Парамонов А. М., Блинов В. Н., Суриков В. И. 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: 10.18698/0536-1044-2019-10-78-85.
9. Щерба В. Е., Шалай В. В., Труханова Д. А., Носов Е. Ю., Павлюченко Е. А. Разработка и экспериментальное исследование поршневой гибридной энергетической машины с газовым объемом на всасывании // *Вестник машиностроения*. 2019. № 4. С. 18–22.
10. Щерба В. Е., Тегжанов А. С., Носов Е. Ю., Парамонов А. М., Блинов В. Н., Храпский С. Ф. Сравнительный анализ массогабаритных показателей бескрейцкопфной и крейцкопфной поршневых энергетических машин объемного действия // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019. № 9. С. 88–95. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-88-95.
11. Щерба В. Е., Болштянский А. П., Рыбак А. Т., Носов Е. Ю., Тегжанов А. С. Конструктивные компоновки гибридных машин объемного действия // *Омский научный вестник*. 2018. № 1 (157). С. 10–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-10-18.
12. Shcherba V. E., Tegzhanov A.-Kh.S. Mathematical model of working processes of a positive displacement piston hybrid power machine with a gas cap and two suction valves // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 58, no. 5-6. P. 388–397. DOI: 10.1007/s10556-022-01104-1.

13. Кондаков Л. А., Голубев А. И., Овандер В. Б. [и др.]. Уплотнения и уплотнительная техника: справ. // под ред. Кондакова Л. А., Голубева А. И. Москва: Машиностроение, 1986. 464 с.

14. Орлов Ю. М. Объемные гидравлические машины. Конструкция, проектирование, расчет. Москва: Машиностроение, 2006. 222 с.

15. Болштянский А. П., Щерба В. Е., Лысенко Е. А., Иващенко Т. А. Поршневые компрессоры с бесконтактным уплотнением. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 416 с.

16. Бусаров С. С., Бусаров И. С., Титов Д. С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.

17. Захаренко В. П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2001. 159 с.

18. Кондюрин А. Ю., Щерба В. Е., Лысенко Е. А., Нестеренко И. С., Зимницкий А. Н. К вопросу о получении профиля целевого уплотнения для поршневой гибридной энергетической машины объемного действия // Омский научный вестник. 2016. № 2 (146). С. 36–39.

19. Титов Д. С., Бусаров С. С., Аистов И. П., Вансович К. А. Анализ эффективности применения поршневых уплотнений в тихоходных насосных агрегатах на основе анализа деформированного состояния цилиндрической части камеры сжатия // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. Р. 64–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-64-71.

20. Кондюрин А. Ю., Шалай В. В., Щерба В. Е., Лысенко Е. А., Нестеренко Г. А., Суриков В. И. Результаты экспериментальных исследований целевого уплотнения выполненного в виде гидроида для поршневой гибридной энергетической машины объемного действия // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., 25–30 апр. 2016 г. Омск, 2016. С. 72–73.

21. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

22. Xin D., Feng J., Ding L. [et al.]. Experimental investigation of pressure distribution between the piston rings and its formation in reciprocating compressors // ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 226 (11). P. 2701–2712. DOI: 10.1177/0954406212438151.

23. Yu W., Dianbo X., Jianmei F. [et al.]. Research on sealing performance and self-acting valve reliability in high-pressure oil-free hydrogen compressors for hydrogen refueling stations // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35 (15). P. 8063–8070. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.089.

24. Oliva A., Held S. Numerical multiphase simulation and validation of the flow in the piston ring pack of an internal combustion engine // Tribology International. 2016. Vol. 101. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.04.003.

25. Wolff A. Simulation based study of the system pistonringecylinder of a marine two-stroke engine // Tribology Transactions. 2014. Vol. 57 (4). P. 653–667. DOI: 10.1080/10402004.2014.895886.

26. Xiaohan J., Qingqing Z., Jianmei F. [et al.]. Numerical simulation and experimental study on temperature distribution of self-lubricating packing rings in reciprocating compressors // Mathematical Problems in Engineering. 2016. Vol. 2016 (14). DOI: 10.1155/2016/4029806.

27. Yang B., Bradshaw C. R., Groll E. A. Modeling of a semi-hermetic CO₂ reciprocating compressor including lubrication submodels for piston rings and bearings // International Journal of Refrigeration. 2013. Vol. 36 (7). P. 1925–1937. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.10.017.

28. Shcherba V. E., Shalai V. V., Pustovoy N. V., Pavlyuchenko E. A., Gribanov S. V., Dorofeev E. A. Calculation of the Incompressible Viscous Fluid Flow in Piston Seals of Piston Hybrid Power Machines // Machines. 2020. Vol. 8 (2). P. 1–28. DOI: 10.3390/machines8020021.

ПАВЛЮЧЕНКО Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6223-7909

AuthorID (РИНЦ): 644122

AuthorID (SCOPUS): 55956907000

ResearcherID: N-4395-2013

Адрес для переписки: hystonru@mail.ru

ТЕГЖАНОВ Аблай Хан Савитович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6637-4059

AuthorID (РИНЦ): 518325

ORCID: 0000-0002-5262-008X

AuthorID (SCOPUS): 57191240901

ResearcherID: D-5093-2014

ЛЫСЕНКО Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4506-1197

AuthorID (РИНЦ): 686387

КУЖБАНОВ Акан Каербеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5843-8008

AuthorID (РИНЦ): 667735

Для цитирования

Павлюченко Е. А., Тегжанов А. С., Щерба В. Е., Лысенко Е. А., Кужбанов А. К. Анализ методов расчета уплотнений гибридных энергетических машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 40–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-40-46.

Статья поступила в редакцию 16.01.2023 г.

© Е. А. Павлюченко, А. С. Тегжанов, В. Е. Щерба, Е. А. Лысенко, А. К. Кужбанов

THE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING SEALS OF HYBRID POWER MACHINES

E. A. Pavlyuchenko, A. S. Tegzhanov, V. E. Shcherba,
E. A. Lysenko, A. K. Kuzhbanov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article discusses the main methods for calculating seals of hybrid power machines. The analysis of works on the designs of hybrid power machines is carried out. The main types of piston seals of pumps, compressors and hybrid power machines are considered, with an emphasis on the main advantages and disadvantages of each type of seal, as well as recommendations on the choice of seals for hybrid power machines. Based on the analysis of the work on the research of piston seals, the main methods for calculating the seals of hybrid power machines are considered and the most suitable one is determined.

Keywords: seals, hybrid machines, power machines, step seals, slot seals, seal in the form of a hydrodiode.

Acknowledgements

The study is supported by grant MK-4256.2022.4.

References

1. Mousavi S., Kara S., Kornfeld B. Energy Efficiency of Compressed Air Systems // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 15. P. 313–318. DOI: 0.1016/j.procir.2014.06.026. (In Engl.).
2. Patil V. C., Acharya P., Ro P. I. Experimental investigation of heat transfer in liquid piston compressor // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 146. P. 169–179. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.121. (In Engl.).
3. Shcherba V. E., Pavlyuchenko E. A., Nosov E. Yu., Bulgakova I. Yu. Approximation of the compression process to isothermal in a reciprocating compressor with a liquid piston // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 207. 118151. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118151. (In Engl.).
4. Mousavi S., Kara S., Kornfeld B. Energy efficiency of compressed air systems // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 15 (4). P. 313–318. DOI: 10.1016/j.procir.2014.06.026. (In Engl.).
5. Shcherba V. E. Rabochiye protsessy kompressorov ob'yemnogo deystviya [Working processes of volumetric compressors]. Moscow, 2008. 319 p. (In Russ.).
6. Scherba V. E., Bolshtyanskiy A. P., Kaygorodov S. Yu., Kuzeyeva D. A. Analiz osnovnykh preimushchestv ob'yedineniya kompressorov i nasosov ob'yemnogo deystviya v edinyy agregat [Analysis of advantages of integration of displacement compressors and pumps into single unit] // *Vestnik mashinostroyeniya. Vestnik Mashinostroyeniya*. 2015. No. 12. P. 15–19. (In Russ.).
7. Shcherba V. E., Bolshtyanskiy A. P., Shalay V. V., Khodoreva A. V. Nasos-kompressory. Rabochiye protsessy i osnovy proyektirovaniya [Pump-compressors. Workflows and design basics]. Moscow, 2013. 388 p. ISBN 978-5-94275-670-3. (In Russ.).
8. Shcherba V. E., Nosov E. Yu., Tegzhanov A. S., Paramonov A. M., Blinov V. N., Surikov V. I. Eksperimental'noye issledovaniye beskreytskopfnoy porshnevoy gibridnoy energeticheskoy mashiny ob'yemnogo deystviya s intensivnym okhlazhdeniyem komprimiruyemogo gaza [An experimental study of a crossheadless piston hybrid power positive displacement machine with intensive cooling of the compressed gas] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2019. No. 10. P. 78–85. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-10-78-85. (In Russ.).
9. Shcherba V. E., Shalay V. V., Trukhanova D. A., Nosov E. Yu., Pavlyuchenko E. A. Razrabotka i eksperimental'noye issledovaniye porshnevoy gibridnoy energeticheskoy mashiny s gazovym ob'yemom na vsasyvanii [Development and experimental study of a piston hybrid energy machine with gas intake volume] // *Vestnik mashinostroyeniya. Vestnik Mashinostroyeniya*. 2019. No. 4. P. 18–22. (In Russ.).
10. Shcherba V. E., Tegzhanov A. S., Nosov E. Yu., Paramonov A. M., Blinov V. N., Khrapskiy S. F. Sravnitel'nyy analiz massogabaritnykh pokazateley beskreytskopfnoy i kreytskopfnoy porshnevnykh energeticheskikh mashin ob'yemnogo deystviya [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. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2019. No. 9. P. 88–95. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-88-95. (In Russ.).
11. Scherba V. E., Bolshtyanskiy A. P., Rybak A. T., Nosov E. Yu., Tegzhanov A. S. Konstruktivnyye komponovki gibridnykh mashin ob'yemnogo deystviya [Constructive schemes of hybrid machines of volumetric action] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 1 (157). P. 10–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-10-18. (In Russ.).
12. Shcherba V. E., Tegzhanov A.-Kh.S. Mathematical model of working processes of a positive displacement piston hybrid power machine with a gas cap and two suction valves // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 58, no. 5-6. P. 388–397. DOI: 10.1007/s10556-022-01104-1. (In Engl.).
13. Kondakov L. A., Golubev A. I., Ovander V. B. [et al.]. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: cprav. [Seals and sealing technology: Handbook] // ed. by Kondakova L. A., Golubeva A. I. Moscow, 1986. 464 p. (In Russ.).
14. Orlov Yu. M. Ob'yemnyye gidravlicheskiye mashiny. Konstruktsiya, proyektirovaniye, raschet [Volumetric hydraulic machines. Construction, design, calculation]. Moscow, 2006. 222 p. (In Russ.).
15. Bolshtyanskiy A. P., Shcherba V. E., Lysenko E. A., Ivakhnenko T. A. Porshnevyye kompressory s beskcontactnym uplotneniyem [Piston compressors with non-contact seal]. Omsk, 2010. 416 p. (In Russ.).
16. Busarov S. S., Busarov I. S., Titov D. S. Eksperimental'noye opredeleniye usloynykh zazorov tsilindroporshnevnykh uplotneniy kompressornykh agregatov [Experimental determination of conditional clearances for cylinder piston seals of compressor units] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye*

i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56. (In Russ.).

17. Zakharenko V. P. Osnovy teorii uplotneniy i sozdaniye porshnevnykh kompressorov bez smazki [Basic sealing theory and the development of non-lubricated piston compressors]. St. Petersburg, 2001. 159 p. (In Russ.).

18. Kondyurin A. Yu., Shcherba V. E., Lysenko E. A., Nesterenko I. S., Zimnitskiy A. N. K voprosu o poluchenii profilya shchelevogo uplotneniya dlya porshnevoy gibridnoy energeticheskoy mashiny ob'yemnogo deystviya [To the question making profile of gap seal for piston hybrid energy machine of volumetric action] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2016. No. 2 (146). P. 36–39. (In Russ.).

19. Titov D. S., Busarov S. S., Aistov I. P., Vansovich K. A. Analiz effektivnosti primeneniya porshnevnykh uplotneniy v tikhokhodnykh nasosnykh agregatakh na osnove analiza deformirovannogo sostoyaniya tsilindricheskoy chasti kamery szhatiya [Analysis of piston seals efficiency in silent pump units using analysis of deformed state of compression chamber cylindrical part] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 64–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-64-71. (In Russ.).

20. Kondyurin A. Yu., Shalay V. V., Shcherba V. E., Lysenko E. A., Nesterenko G. A., Surikov V. I. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy shchelevogo uplotneniya vypolnennogo v vide gidroida dlya porshnevoy gibridnoy energeticheskoy mashiny ob'yemnogo deystviya [Experimental results of a hydrostatic slotted seal for a reciprocating hybrid displacement power machine] // *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Petrochemical and Oil and Gas Engineering and Technology*. Omsk, 2016. P. 72–73. (In Russ.).

21. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vol. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed., Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0.2000. (In Russ.).

22. Xin D., Feng J., Ding L. [et al.]. Experimental investigation of pressure distribution between the piston rings and its formation in reciprocating compressors // *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C. Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012. Vol. 226 (11). P. 2701–2712. DOI: 10.1177/0954406212438151. (In Engl.).

23. Yu W., Dianbo X., Jianmei F. [et al.]. Research on sealing performance and self-acting valve reliability in high-pressure oil-free hydrogen compressors for hydrogen refueling stations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35 (15). P. 8063–8070. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.089. (In Engl.).

24. Oliva A., Held S. Numerical multiphase simulation and validation of the flow in the piston ring pack of an internal combustion engine // *Tribology International*. 2016. Vol. 101. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.04.003. (In Engl.).

25. Wolff A. Simulation Based Study of the System Piston–Ring–Cylinder of a Marine Two-Stroke Engine // *Tribology Transactions*. 2014. Vol. 57 (4). P. 653–667. DOI: 10.1080/10402004.2014.895886. (In Engl.).

26. Xiaohan J., Qingqing Z., Jianmei F. [et al.]. Numerical simulation and experimental study on temperature distribution

of self-lubricating packing rings in reciprocating compressors // *Mathematical Problems in Engineering*. 2016. Vol. 2016 (14). DOI: 10.1155/2016/4029806. (In Engl.).

27. Yang B., Bradshaw C. R., Groll E. A. Modeling of a semi-hermetic CO₂ reciprocating compressor including lubrication submodels for piston rings and bearings // *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36 (7). P. 1925–1937. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.10.017. (In Engl.).

28. Shcherba V. E., Shalay V. V., Pustovoy N. V., Pavlyuchenko E. A., Gribov S. V., Dorofeev E. A. Calculation of the Incompressible Viscous Fluid Flow in Piston Seals of Piston Hybrid Power Machines // *Machines*. 2020. Vol. 8 (2). P. 1–28. DOI: 10.3390/machines8020021. (In Engl.).

PAVLYUCHENKO Evgeniy Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
 SPIN-code: 6223-7909
 AuthorID (RSCI): 644122
 AuthorID (SCOPUS): 55956907000
 ResearcherID: N-4395-2013
 Correspondence address: hystonru@mail.ru

TEGZHANOV Ablaj Han Savitovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Hydromechanics and Transport Machines Department, OmSTU, Omsk.

SHCHERBA Viktor Evgenyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Hydromechanics and Transport Machines Department, OmSTU, Omsk.
 SPIN-code: 6637-4059
 AuthorID (RSCI): 518325
 AuthorID (SCOPUS): 57191240901
 ResearcherID: D-5093-2014

LYSENKO Evgeniy Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Hydromechanics and Transport Machines Department, OmSTU, Omsk.
 SPIN-code: 4506-1197
 AuthorID (RSCI): 686387

KUZHBANOV Akan Kaerbaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Hydromechanics and Transport Machines Department, OmSTU, Omsk.
 SPIN-code: 5843-8008
 AuthorID (RSCI): 667735

For citations

Pavlyuchenko E. A., Tegzhanov A. S., Shcherba V. E., Lysenko E. A., Kuzhbanov A. K. The analysis of methods for calculating seals of hybrid power machines // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 40–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-40-46.

Received January 16, 2023.

© E. A. Pavlyuchenko, A. S. Tegzhanov, V. E. Shcherba, E. A. Lysenko, A. K. Kuzhbanov