

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ РОТАЦИОННЫХ МАШИН ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ХОЛОДИЛЬНОЙ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В. Л. Юша¹, А. Ю. Громов², Ю. А. Потапов³

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²АО НТК «Криогенная техника»,
Россия, 644105, г. Омск, ул. 22 Партсъезда, д. 97, корп. 1

³АО «Группа компаний «Титан»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 30

Представлен обзорный анализ исследований и разработок в области ротационных машин объемного действия для малой энергетики, холодильной и климатической техники; рассмотрено состояние мирового и российского рынка компрессорных и расширительных машин такого типа. Показано, что в этом секторе отечественного машиностроения существующий уровень и масштабы производства не соответствуют требованиям обеспечения технологической независимости РФ и реализации критических технологий.

Анализ существующих конструкций ротационных машин объемного действия, а также номенклатуры отечественного холодильного и компрессорного машиностроения показал, что для реализации существующих лицензионных технологий на российских предприятиях предпочтительны ротационные машины винтового и спирального типа. Однако, с учетом актуальности обеспечения импортонезависимости РФ, наибольший интерес представляют ротационно-пластинчатые компрессорные и расширительные машины. Выявлены и сформулированы предпосылки для повышения технического уровня и конкурентоспособности ротационно-пластинчатых машин на базе существующих отечественных технологий и новых перспективных технических решений.

Ключевые слова: ротационные машины объемного действия, компрессоры, расширительные машины, конкурентоспособность, малая энергетика, холодильная техника, климатические системы, характеристики, ранжирование.

Одной из приоритетных задач, стоящих перед отечественной энергетикой и смежными отраслями, является обеспечение технологической независимости, в том числе обеспечение полного импортозамещения, определение направлений развития и стимулирования отечественного машиностроения [1–3 и др.]. Разработка и масштабное промышленное освоение малых энергопреобразующих систем и комплексов [4–11 и др.], составляющих основу автономного и децентрализованного энергоснабжения, климатических и низкотемпературных систем для предприятий малого бизнеса и фермерских хозяйств, социальных объектов, малых поселений и частных домовладений, мобильных технологических объектов и пр., является обязательным условием развития российских регионов, а также уникальной возможностью создания конкурентных энергосберегающих технологий, востребованных на рынках развивающихся стран. Однако, несмотря на то, что такие системы и комплексы необходимы для реализации значительной части критических технологий, определяющих безопасность страны в экономическом и политическом аспектах (Указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г.; Распоряжение Правительства РФ от 14 июля 2012 г. № 1273-р), производство российского оборудования для малой энергетики, холодильной и климатической техники практически отсутствует (табл. 1) [12–18 и др.].

Опыт зарубежных стран показывает, что технологическое развитие предполагает не только импорт передовых технологий, но и реализацию в реальном секторе экономики собственного научно-технического потенциала. Характерным примером эффективного решения инновационных задач по созданию и промышленному освоению перспективной техники для объектов малой энергетики являются так называемые микротурбины — наukoёмкое оборудование, крупнейшими зарубежными производителями которого в настоящее время являются Capstone, Ingersoll-Rand PW, Turbec, Elliott, Bowmen, General Electric, Toyota [19–23 и др.]. Начав освоение микротурбинных технологий в 1995–1997 гг., в настоящее время эти компании доминируют на мировом рынке. Известен опыт освоения этой технологии и в России (ОАО «Калужский двигательный завод», ФГУП «Завод им. В. Я. Климова», ООО НТЦ «Микротурбинные технологии», ОАО НТЦ ЦКТИ и др.) [9, 11], что позволяет прогнозировать возможность реализации отечественной программы импортозамещения в этом сегменте автономных энергоустановок.

Наряду с этим направлением, мировыми технологическими лидерами интенсивно разрабатываются такие перспективные технологии, как системы рекуперации на базе ОРС-циклов, генераторы на базе паровых и газовых расширительных агрега-

Таблица 1. Объёмы мирового рынка оборудования для малой энергетики, холодильной и климатической техники. Соотношение объёмов производства и продаж этого оборудования в РФ (по состоянию на 2021 год)

Table 1. Volumes of the world market of equipment for low power energy, refrigeration and climate technology. The ratio of production and sales of this equipment in the Russian Federation (as of 2021)

№ п/п	Наименование объекта	Годовой объём мирового рынка	Годовой объём российского рынка	Оборудование российского производства на рынке РФ (%)
1	Компрессорное и расширительное оборудование для холодильной техники	Более 200 млн ед.	5,5 млн ед. (из них бытовое — 5 млн ед.)	Не более 5 %
2	Компрессорное оборудование для климатических систем	Более 150 млн ед.	1 млн ед.	Не более 5 %
3	Компрессорное и расширительное оборудование для энергетических установок малой мощности	Более 2 млн ед.	Около 1000 ед.	Около 0 %

Таблица 2. Основные типы ротационных машин объёмного действия, их разработчики и изготовители

Table 2. The main types of volumetric rotary machines, their developers and manufacturers

Тип	Зарубежные производители	Российские производители
Винтовые (screw)	Atlas Copco, Bitzer, Climate Emerson, Ingersoll-Rand, GEA Refrigeration Technologies, Bitzer, Fusheng, Kaezer kompressoren, Trane, Carrier, Johnson Controls, Howden, Mayekawa Manufacturing Co., Svenska Rotor Maskiner AB, Fu Sheng Precision Co, Carlyle, Frascold, Hitachi, Refcomp SPA, Hanbell Precise Machinery, Snowman, Kobe Steel, Becker, Gardner Denver, Daikin Industries, Mitsubishi Electric и др. [33–58 и др.]	ООО «Челябинский компрессорный завод», АО «Компрессор», АО «Машиностроительный завод «Арсенал», ООО «Краснодарский компрессорный завод», ОАО «Пензкомпрессормаш», АО «Казанькомпрессормаш» и др. [54–63 и др.]
Спиральные (scroll)	Ingersoll Rand, Bitzer, Daikin, Atlas Copco, Danfoss, HITACHI, Climate Emerson, Panasonic, Fini, Ceccato, Dalgakiran, Renner, BOGE и др. [12, 13, 46–49, 64–71 и др.]	ООО «Челябинский компрессорный завод», АО «Вакууммаш», ООО «Краснодарский компрессорный завод» и др. [59, 62, 75 и др.]
Ротационно-пластинчатые (rotary vane; sliding vane)	Mattei, TORAD, CVS, Ro-Flo, CompAir-HIDROVANE, MAPNER, DVP, BECKER и др. [76–104 и др.]	АО «Компрессор», ООО «Техпром-Н», ООО «Средневожский машиностр. завод», ПАО НПО «Искра» [61, 76, 77, 105–107]
С катящимся ротором (пластинчато-статорные) (rolling piston)	Guangdong Meizhi Compressor Company, Rechi, Panasonic, Mitsubishi Electric, Highly, LG, Siam Compressors Industry (SCI), Samsung, AVIC (Shenyang Sanyo), HITACHI, TOCHIBA, DAIKIN, Gree Electric Appliances, Bitzer и др. [108–113 и др.]	[114, 115 и др.]
Другие конструкции	[38, 116–121, 123–128 и др.]	[119–121, 124–126 и др.]

тов, тепловые насосы, широкий спектр климатических и низкотемпературных систем на базе эффективных термодинамических циклов и современных рабочих веществ [24–32 и др.]. В рассматриваемом диапазоне мощностей (0,5...100,0 кВт) и расходов рабочего газа (0,1...10,0 нм³/мин) основным технологическим компонентом таких систем являются преимущественно ротационные машины объёмного действия (РМОД) [33]. Они, в отличие от малоразмерных турбоагрегатов, при малых производительностях обеспечивают существенно более высокую разность давлений между входным и выходным патрубками; а в отличие от поршневых агрегатов — более компактны, уравновешены, технологичны и надёжны [34–39 и др.]. Поэтому в рамках этой статьи ограничимся сравнительным анализом применимости в энергопреобразующих установках малой мощности различного назначения ротационных компрессорных и расширительных машин объёмного действия [33–39 и др.], а также возмож-

ности и целесообразности их разработки и производства на российских предприятиях.

Укрупнённые группы основных типов РМОД, востребованных на мировом рынке и потенциально применимых в рассматриваемых энергопреобразующих установках, представлены в табл. 2. Кроме этого, в разделе «Другие конструкции» представлены машины, не получившие на сегодняшний день широкого практического применения, но привлекающие к себе внимание инженеров и исследователей: машины трохойдного типа (trochoid, hypotrochoidal gerotor), с внутренним зацеплением (internally geared screw), с нелинейной синхронизацией роторов (swing vane; Schakey-type, ...).

Специфика конструкций РМОД и их рабочих процессов требует некоторых предварительных пояснений. Как известно, важнейшей характеристикой любой машины объёмного действия является интенсивность массовых потоков рабочего тела через неплотности рабочей камеры. Их относитель-

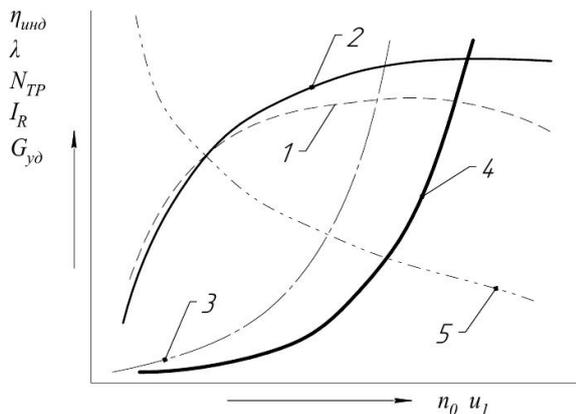


Рис. 1. Влияние быстроходности ротационных машин объёмного действия на характер изменения их индикаторного КПД (1), коэффициента подачи (2), мощности трения (3), нагрузок от действия неуравновешенных масс (4), удельного веса (5)

Fig. 1. The influence of the speed of volumetric rotary machines on the nature of changes in their indicator efficiency (1), volumetric efficiency (2), friction power (3), loads from the action of unbalanced masses (4), specific weight (5)

ная величина снижается при уменьшении времени протекания рабочего цикла. То есть при увеличении быстроходности улучшаются такие характеристики, как коэффициент подачи и индикаторный КПД РМОД [40, 41, 57, 58, 76, 120, 125–127 и др.]; а также снижается их металлоёмкость (рис. 1). Однако при наличии контактных уплотнений увеличение быстроходности ведёт к повышенному износу трущихся деталей и недопустимым потерям мощности на механическое трение [76, 77, 124]; по результатам исследований, представленных в [77, 125], эти потери увеличиваются существенно интенсивнее изменения окружной скорости (рис. 1). Одновременно увеличиваются нагрузки, обусловленные вращением неуравновешенных элементов роторов (при их наличии) и влияющие на работоспособность подшипниковых узлов; растут температуры конструктивных элементов; повышаются гидромеханические и газодинамические потери мощности [57, 76, 120, 121, 126 и др.].

Такое взаимоисключающее влияние быстроходности на различные эксплуатационные параметры во многом определяет характеристики РМОД различных типов, анализ которых представлен далее.

Винтовые компрессорные и расширительные машины (ВМ)

ВМ — один из самых распространённых типов РМОД (табл. 2). Кроме признанных технологических лидеров, определяющих высокий технический уровень ВМ [46–49, 57, 58], во многих странах, в том числе в России, успешно тиражируются лицензионные технологии производства ВМ. В основном это двухроторные ВМ с подачей масла в рабочую камеру [59–63]. Некоторыми компаниями выпускаются однороторные ВМ, в которых с одним основным винтовым ротором взаимодействуют два отсека (Emerson, Mitsubishi Electric и Daikin); а также трёхроторные ВМ (Carrier) [50–56, 129]. ВМ могут быть «сухого» исполнения либо работать с подачей в рабочую камеру масла или воды [40, 43–49, 57–63]. Среди всех рассматриваемых типов машин ВМ охватывают наиболее широкий

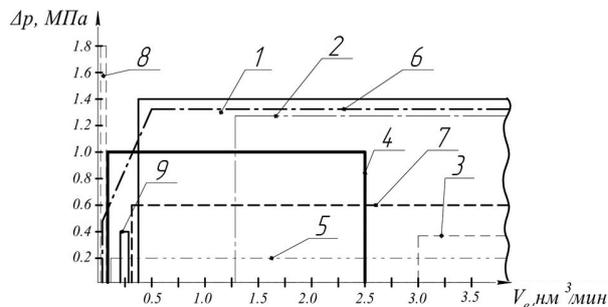


Рис. 2. Диапазоны производительностей и разности давлений нагнетания и всасывания основных типов ротационных машин объёмного действия: 1 — ВММ; 2 — ВМВ; 3 — ВМС; 4 — СПМ; 5 — РПМС; 6 — РПММ; 7 — ТТМ; 8 — РМКР; 9 — РМНС
Fig. 2. Performance ranges and pressure differences of injection and suction the main types of volumetric rotary machines: 1 — ВММ; 2 — ВМВ; 3 — ВМС; 4 — СПМ; 5 — РПМС; 6 — РПММ; 7 — ТТМ; 8 — РМКР; 9 — РМНС

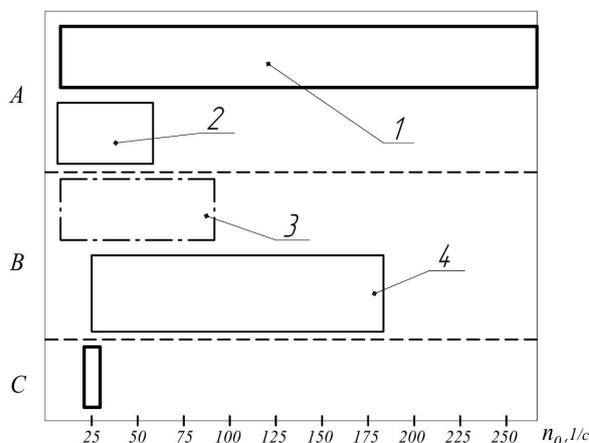


Рис. 3. Диапазоны рабочих частот вращения роторов и уравновешенность основных типов ротационных машин объёмного действия: 1 — ВМ; 2 — РПМ; 3 — РМКР; 4 — СПМ, ТТМ; 5 — РМНС; А — уравновешенная конструкция; В — конструкция, уравновешиваемая с помощью дополнительных элементов; С — неуравновешиваемая конструкция
Fig. 3. The ranges of operating speeds of the rotors and the balance of the main types of volumetric rotary machines: 1 — ВМ; 2 — РПМ; 3 — РМКР; 4 — СПМ, ТТМ; 5 — РМНС; А — is a balanced construction; В — is a construction balanced with the help of additional elements; С — is an unbalanced construction

диапазон производительностей (рис. 2) — в маслозаполненном исполнении производительность ВМ достигает 50 м³/мин и более, в «сухом» исполнении может превышать 100 м³/мин [46–49]. ВМ характеризуются полной уравновешенностью и отсутствием контактных уплотнений в рабочей камере, что обеспечивает высокую быстроходность (рис. 3) и, соответственно, компактность и малый вес. Однако есть в конструктивной схеме ВМ и критичные составляющие. Прежде всего, это высокие нагрузки на подшипниковые узлы [40]: принцип действия винтовой пары обуславливает воздействие на роторы поперечных и осевых газовых сил, которые воспринимаются опорными подшипниками. С этой точки зрения, ВМ являются одними из наиболее высоконагруженных среди всех РМОД (рис. 4). Поэтому, хотя базовая конструктивная

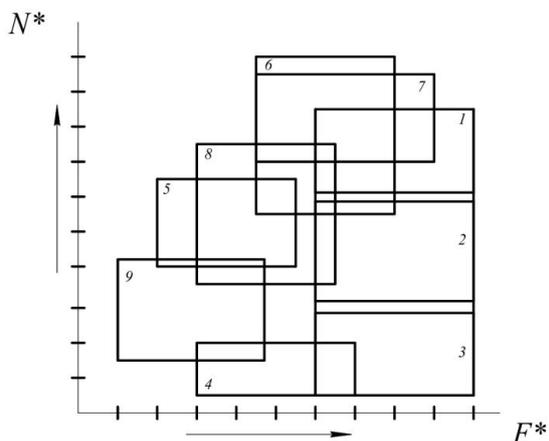


Рис. 4. Соотношение величины нагрузок на конструктивные элементы и суммарных потерь мощности основных типов ротационных машин объёмного действия:

1 — ВММ; 2 — ВМВ; 3 — ВМС; 4 — СПМ; 5 — РПМС; 6 — РПММ; 7 — ТТМ; 8 — РМКР; 9 — РМНС

Fig. 4. The ratio of the magnitude of loads on structural elements and the total power losses of the main types of volumetric rotary machines:

1 — ВММ; 2 — ВМВ; 3 — ВМС; 4 — СПМ; 5 — РПМС; 6 — РПММ; 7 — ТТМ; 8 — РМКР; 9 — РМНС

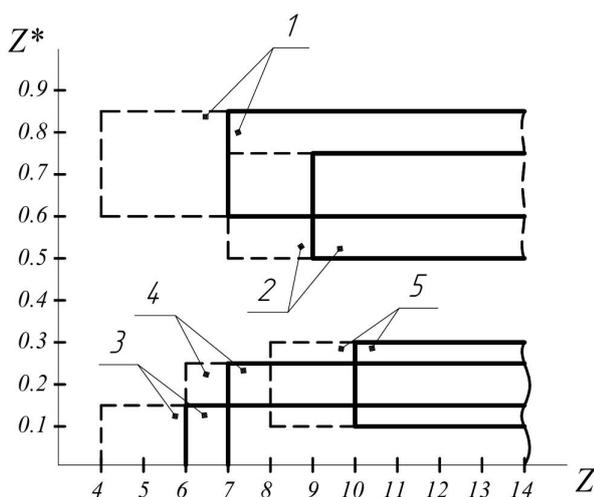


Рис. 5. Сравнительная оценка уровня технологичности основных типов ротационных машин объёмного действия: 1 — ВМ; 2 — СПМ, ТТМ; 3 — РПМ; 4 — РМКР; 5 — РМНС

Fig. 5. Comparative assessment of the level of manufacturability of the main types of volumetric rotary machines:

1 — ВМ; 2 — СПМ, ТТМ; 3 — РПМ; 4 — РМКР; 5 — РМНС

схема ВМ и предполагает наличие всего четырёх подшипников (по два на каждом роторе), для обеспечения требуемого ресурса (40 000...60 000 часов) в большинстве современных ВМ установлено по 6...8 подшипников [46–49]. Жёсткие требования по обеспечению уравновешенности при высокой быстроходности предполагают не менее жёсткие требования к точности изготовления подшипников. Механические потери мощности в подшипниках и уплотнительных узлах ВМ незначительны по сравнению со многими другими РМОД (рис. 4); однако при подаче масла в рабочую камеру ВМ потери мощности на преодоление гидромеханических и газодинамических потерь в рабочей камере, а также гидравлических потерь в маслосистеме весьма существенны. При анализе уровня технологичности

ВМ (рис. 5) отметим, что в базовом варианте конструктивной схемы предполагается наличие всего семи основных элементов: корпуса, двух винтовых роторов и четырех подшипников. Но большинство этих элементов (роторы с профилированной винтовой нарезкой и высоконагруженные быстроходные прецизионные подшипники) являются технологически сложными объектами, для изготовления которых требуется специальное высокоточное дорогостоящее оборудование. Более того, для повышения конкурентоспособности ВМ крупными компаниями разрабатываются и внедряются ещё более сложные перспективные технологии, например, прецизионное шлифование профилированных поверхностей, напыление на эти поверхности металлических и полимерных плёнок [45–49]. Стоит отметить, что в настоящее время с ВМ жёстко конкурируют машины других типов. Например, по данным АПИК в холодильной технике и системах кондиционирования из области малых производительностей их теснят спиральные компрессоры, а из области больших производительностей — центробежные; объём мирового рынка ВМ в 2021 году составил около 130 000 единиц оборудования [129].

Спиральные компрессорные и расширительные машины (СПМ)

СПМ появились на мировом рынке в 70-х гг. прошлого столетия, т.е. сравнительно недавно по сравнению с другими типами РМОД. Связано это с жёсткими требованиями к обеспечению высокой точности изготовления деталей сложной формы. Не случайно первыми освоили производство СПМ такие мировые технологические лидеры, как японская НТАСНИ и американская Copeland Corp. На сегодняшний день СПМ являются одним из самых покупаемых типов РМОД, производством которого занимаются ведущие мировые компании (табл. 2). Несмотря на то, что диапазон рабочих параметров СПМ не такой широкий, как у ВМ, они занимают лидирующие позиции на рынке холодильных компрессоров для коммерческого оборудования и систем кондиционирования [12, 13, 68–70, 71–74 и др.]; достаточно отметить, что лишь под брендом Copeland Scroll выпущено уже более 100 млн единиц таких машин. Годовой мировой рынок СПМ по данным АПЕК в 2021 году составил более 15 млн единиц [129]. В России тиражированием этой технологии применительно к воздушным компрессорам занимаются в Челябинске и Краснодаре [59, 62], в Казани освоено производство спиральных вакуумных насосов [75]. По сравнению с ВМ спиральные машины обеспечивают высокую энергоэффективность без подачи большого количества масла в рабочую камеру (рис. 2), а также низкий уровень шума за счёт сверхмалых скоростей газа в процессе всасывания. Последнее обеспечивается за счёт того, что угол поворота ротора в процессе всасывания близок к 2π . В отдельных случаях могут быть реализованы высокооборотные режимы (до 200...250 1/с) (рис. 3), хотя в большинстве случаев они заметно ниже (около 50 1/с). Конструкция СПМ ближе к однороторным машинам, так как одна из спиралей в большинстве случаев неподвижна и закреплена на корпусе. При этом вторая спираль совершает сложное движение, обеспечивая перемещение точек контакта спиральных поверхностей от периферии к центру без вращения вокруг собственной оси, что существенно усложняет конструкцию

механизма движения и требует дополнительного уравнивания вращающихся конструктивных элементов. Негативным фактором в СПМ являются поперечные и осевые газовые силы, а также центробежные силы, действующие на вращающийся ротор и приводящие к повышенным нагрузкам на подшипники (рис. 4). Это является одной из причин ограничения диапазона максимально достижимой производительности (рис. 2), так как при увеличении диаметра роторов эти нагрузки существенно возрастают. Низкие потери мощности (индикаторные и на механическое трение) обеспечивают СПМ самую высокую энергоэффективность по сравнению с другими РМОД (рис. 4). Несмотря на то, что базовая схема СПМ уже содержит несколько технологически сложных конструктивных элементов: высоконагруженные высокоскоростные прецизионные подшипники и прецизионные спиральные элементы с торцевыми уплотнениями, появляются еще более сложные перспективные технологии: например, нанесение на спиральные поверхности антифрикционных твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена и графита [72]. Для изготовления таких деталей требуется специальное и высокоточное дорогостоящее оборудование, поэтому конструкция СПМ, как и ВМ, является технологически сложной (рис. 5). Уместно ещё раз отметить, что количественное соотношение востребованных на рынке типов компрессоров изменяется: в настоящее время СПМ вытесняют ВМ в область более высоких производительностей; при этом сами СПМ не выдерживают конкуренции с поршневыми и некоторыми типами РМОД в области малых производительностей [129].

Ротационно-пластинчатые компрессорные и расширительные машины (РПМ)

В области малых и сверхмалых производительностей всё более широкое распространение получают пластинчатые ротационные компрессорные и расширительные машины [76–115]. В 2021 году объём рынка одних только холодильных компрессоров такого типа составил более 200 млн единиц оборудования [129]. Неудивительно, что даже такие мировые компании, как Bitzer, традиционно выпускающие компрессоры поршневого, винтового и спирального типа, расширяют свою номенклатуру и начинают заниматься разработкой и производством пластинчатых ротационных компрессоров [130].

Конструктивно всё многообразие пластинчатых ротационных компрессорных и расширительных машин можно разделить на ротационно-пластинчатые (РПМ), у которых пазы для размещения разделительных пластин выполнены в роторе, и статорно-пластинчатые или ротационные с катящимся ротором (РМКР), у которых пазы для размещения разделительных пластин выполнены в цилиндре (статоре). И те, и другие серийно производятся ведущими мировыми компаниями (табл. 2). Поскольку эти две группы машин имеют конструктивные отличия, отражающиеся на их характеристиках, рассмотрим их отдельно.

При анализе диапазона возможных рабочих параметров малоразмерных РПМ следует отметить, что в маслозаполненном варианте они практически не уступают ВМ и СПМ (рис. 2). Более того, их достижимая минимальная производительность составляет менее $0,1 \text{ нм}^3/\text{мин}$, тогда как

у ВМ она около $0,4 \text{ нм}^3/\text{мин}$, у СПМ — не менее $0,1 \text{ нм}^3/\text{мин}$. В зарубежной печати РПМ рассматриваются как один из перспективных типов расширительных машин, применимых в технологических и энергетических установках малой мощности на базе паровых и ОРС-циклов [78–80, 84–91]. По степени уравниваемости РПМ вместе с ВМ превосходит остальные типы РМОД, однако по быстроходности заметно уступает практически всем (рис. 3). Более того, у большинства серийно выпускаемых РПМ ротор вращается с частотой, не превышающей 25 1/с [92–107]. При этом механический КПД таких машин зачастую не превышает $40–50 \%$. Это объясняется влиянием быстроходности на величину мощности трения (рис. 1). Так, например, при увеличении окружной скорости с 5 м/с до $20–25 \text{ м/с}$ относительные потери мощности на трение в рабочей камере ротационно-пластинчатого компрессора ($N_{\text{тр}}/N_{\text{инд}}$) могут возрасти с $10...30 \%$ до 500% и более в зависимости от количества пластин, применения впрыскиваемой жидкости и её свойств [77]. Снижение же скорости вращения приводит к тому, что в «сухом» режиме из-за интенсивных утечек и перетечек сжимаемого газа через неплотности рабочей камеры λ и $\eta_{\text{инд}}$ РПМ недопустимо малы, и они могут работать лишь в режиме воздуходувок или вакуум-насосов (рис. 2) [93–95, 105, 107 и др.]. В маслозаполненном варианте диапазон реализуемых рабочих давлений и производительностей обеспечивает РПМ востребованность и конкурентоспособность [92, 96, 103, 104 и др.].

Очевидно, что при снижении механического трения в рабочей камере РПМ диапазон рабочих частот вращения роторов может быть увеличен. В настоящее время существует два основных подхода к решению этой проблемы. Один из них — снижение центробежных сил, действующих на пластины, за счёт их взаимной компенсации при обеспечении взаимодействия двух противоположно расположенных пластин [78, 82, 97–102 и др.]. Другой — снижение относительной скорости скольжения пластины по сопрягаемой поверхности за счёт вращения этой поверхности в дополнительных подшипниках [76, 83, 84, 130 и др.]. Например, компания TORAD предложила новую конструкцию РПМ spool-типа со взаимной компенсацией центробежных сил двумя противоположно расположенными пластинами [97], обеспечивающую при изменении соотношения давлений нагнетания и всасывания от $1,5$ до $5,5$ величину изменения коэффициента подачи от $0,96$ до $0,8$ и адиабатного КПД от $0,8$ до $0,6$ [98, 99, 101]. Однако эта конструкция предполагает обязательное наличие дополнительных уплотнительных элементов, установленных на периферийных поверхностях пластин [100–102], а также специальной плавающей втулки внутри ротора [97].

Для большинства конструктивных версий РПМ трение пластин в рабочей камере, вызывающее повышенные потери мощности, изгибающие нагрузки на пластины и их износ, дополняется значительными газовыми силами, радиально действующими на ротор и определяющими нагрузки на подшипники. В связи с этим по перечисленным параметрам РПМ уступает другим типам РМОД (рис. 4). Известны технические решения, несколько усложняющие конструкцию РПМ, но при этом обеспечивающие практически полную разгрузку подшипников от действия газовых сил на ротор [38, 76 и др.].

Важно отметить, что значительным конкурентным преимуществом РПМ является их высокая технологичность (рис. 5). При небольшой номенклатуре основных деталей все они достаточно просты в изготовлении, что предполагает как возможность совершенствования конструкций РПМ для устранения отмеченных выше проблем, так и тиражирование известных разработок ведущих мировых производителей [106].

Ротационные компрессорные и расширительные машины с катящимся ротором (пластинчато-статорные) (РМКР)

В Советском Союзе компрессоры типа РМКР в герметичном исполнении выпускались для бытовых кондиционеров и холодильников на бакинском и краматорском заводах (холодопроизводительность 0,7...4 кВт); крупные импортные компрессоры такого типа (холодопроизводительность 55...180 кВт) применялись на рыболовном флоте [115]. В настоящее время компрессорами типа РМКР комплектуется подавляющее большинство бытовых кондиционеров, мировой рынок которых составляет более 120 млн единиц оборудования [129], а также чиллеры, тепловые насосы, холодильное и морозильное оборудование [108–114]. Около 90 % всех ротационных компрессоров в мире, в том числе РМКР, изготавливаются в Китае [129, 130]. Российскими предприятиями компрессорные и расширительные машины типа РМКР не производятся.

По сравнению с РПМ и другими РМОД у РМКР сравнительно узкий диапазон сверхмалых производительностей; при этом наличие развитой сети зазоров при малых геометрических размерах рабочей камеры компенсируется подачей большого количества масла, что обеспечивает требуемую герметичность рабочей камеры (рис. 2). Продолжительный процесс всасывания (угол поворота ротора при всасывании может быть близок к 2π) обеспечивает минимальные индикаторные потери при наполнении рабочей камеры свежей порцией газа. В отличие от РПМ, в конструкции РМКР обычно используется лишь одна разделительная пластина, а ротор имеет возможность поворачиваться относительно оси кривошипа, на котором он установлен, обеспечивая снижение скорости скольжения пластины по цилиндрической поверхности ротора. Эти факторы обеспечивают существенное снижение потерь на механическое трение. Неуравновешенность ротора устраняется противовесами и (или) установкой дополнительных роторов на одном валу. Поэтому РМКР более быстроходные, чем РПМ (рис. 3). Конструктивная схема РМКР предполагает наличие поперечных газовых сил, действующих на ротор, поэтому подшипниковые узлы могут испытывать серьезные нагрузки; потери мощности на механическое трение выше, чем у СПМ и ВМ, однако заметно ниже, чем у РПМ (рис. 4). При оценке технологичности конструкции РМКР (рис. 5) отметим, что эти машины достаточно просты в изготовлении и по этому параметру близки к РПМ. Однако имеют более сложный вращающийся узел, состоящий как минимум из ротора, кривошипного вала и противовеса, и более сложный цилиндр, на внешней поверхности которого обязателен прилив с пазом, в котором размещены пластина и пружина. Кроме этого, в конструкции РМКР обязателен самодействующий клапан нагнетания. Громоздкость конструкции цилиндра во многом объясняет ограни-

ченный диапазон производительности этих машин, так как увеличение диаметра рабочей камеры ведёт к увеличению размеров и веса корпусных деталей, т.е. к ухудшению удельных весовых и габаритных характеристик.

Другие конструкции ротационных компрессорных и расширительных машин объёмного действия

Для полноты представленного обзорного анализа РМОД следует также рассмотреть ряд конструкций, упоминаемых в научно-технических источниках информации, но не нашедших широкого коммерческого применения [116–128 и др.].

В середине прошлого века ротационные машины трохойдного типа (ТТМ) считались одними из наиболее перспективных конкурентов поршневым компрессорам и ДВС [120, 121]. Ведущие мировые компании (Daimler-Benz, NSU, Curtiss-Wright, Goetze, Alfa Romeo, Porsche, Fichtel&Sachs, Perkins, MAN, Toyo Kogyo, Hanomag, Crupp, Yanmar, Mazda, Klockner-Humboldt-Deutz, Westinghouse Aerospace Electrical Division и др.) работали над созданием и внедрением в серийное производство трохойдных двигателей Ванкеля, существенно превосходящих поршневые конструкции по удельным весовым и габаритным показателям [120, 121]. Однако на сегодняшний день лишь Mazda не оставляет попыток найти коммерческое применение такому двигателю (хотя продажи спорткаров RX-8 с роторно-поршневым двигателем Ванкеля Mazda прекратила в 2012 году, компания совместно с Toyota планирует их использовать в качестве дополнительных двигателей электромобилей для подзарядки батарей [117]). На рис. 2–5 представлены сравнительные характеристики ТТМ и РМОД других типов: критическими недостатками ТТМ являются сложность конструкции, высокие нагрузки на конструктивные элементы, высокие потери мощности на трение и утечки через зазоры в рабочей камере. Взаимоисключающие требования по снижению интенсивности утечек через зазоры в рабочей камере и потере мощности на трение (рис. 1) в ТТМ пока не могут быть преодолены. Поэтому, несмотря на известный интерес к РМОД такого типа [38, 116, 118, 122 и др.], трудно предположить в ближайшей перспективе возможность их доработки до уровня конкуренции не только на рынке ДВС, но и на рынке компрессорных и расширительных машин.

Такие же перспективы ожидаемы и для двухроторных винтовых машин с внутренним зацеплением [119 и др.], поскольку проблемы, характерные для рассмотренных выше ВМ, остаются, но при этом появляются и дополнительные. Например, увеличение диаметра внешнего ротора ведёт к росту газовых сил, к увеличению радиальных нагрузок на его подшипники и их диаметра.

Достаточно регулярно появляются публикации, касающиеся ротационных машин с нелинейной синхронизацией роторов (РНМС) (встречаются также названия *swing vane*, «кошки-мышки», *Schukey-type*, компрессор Астановского, роторный компрессор с секторными поршнями) [120, 123–128 и др.]. В них механизм синхронизации обеспечивает вращение двух коаксиально расположенных роторов в одну сторону с различными угловыми скоростями; при этом закреплённые на роторах радиальные лопасти обеспечивают циклическое изменение объёма рабочих ячеек, образованное между со-

Таблица 3. Ранжирование ротационных компрессорных и расширительных машин объёмного действия по основным характеристикам

Table 3. Ranking of volumetric rotary compressor and expansion machines by main characteristics

Тип	Секундный описанный объём (диапазон)	Быстроходность	Величина нагрузок на элементы конструкции	Потери мощности	Технологичность	Итог (сумма мест)
ВКМ	1	1	4	3	4	3 (13)
СПМ	3	2	2	1	3	1 (11)
РПМ	2	4	3	4	1	4 (14)
РМКР	4	3	1	2	2	2 (12)

седними лопастями и поверхностями расточки цилиндра. При наличии публикаций о результатах исследования таких машин, информация об их промышленном производстве (табл. 1) и характеристиках (рис. 2–5) весьма ограничена. Уникальной конструктивной особенностью РНМС, привлекающей внимание исследователей до сегодняшнего дня, является возможность обеспечения повышенного гидравлического сопротивления в зазорах между подвижными деталями рабочей камеры без применения контактных уплотнений. Это достигается за счёт увеличения протяжённости проточной части этих зазоров по направлению течения газа [125, 126 и др.]. Однако требуемая быстроходность при этом не может быть обеспечена, так как имеет место значительная амплитуда изменения угловой скорости роторов [123, 125 и др.], что ведёт к появлению повышенных угловых ускорений и нагрузок в механизме синхронизации. Наличие сложного и массивного механизма синхронизации делает рассматриваемую конструкцию неконкурентоспособной. А сравнительно низкая реально достижимая быстроходность (не более 35 1/с [123–128]) при наличии развитой сети зазоров в рабочей камере не позволяет обеспечить требуемую энергоэффективность рабочего процесса, приводит к необходимости увеличения основных размеров и к недопустимым по сравнению с другими РМОД весовым и габаритным параметрам [126].

Следует отметить, что отсутствие самодействующих клапанов является конкурентным преимуществом РНМС перед поршневыми машинами, занимающими значительную долю на рынке холодильных и воздушных компрессоров малой мощности [14, 47, 129, 130 и др.].

Тенденции развития рынка ротационных компрессорных и расширительных машин и совершенствования их конструкций

При всём многообразии задач по обеспечению национальной технологической безопасности, первичной задачей является достижение требуемых показателей качества российской продукции [1–3, 131–133] (в нашем случае — конкурентоспособных технических характеристик РМОД).

Обобщение результатов проведённого обзорного анализа конструкций ВМ, СПМ, РПМ и РМКР представлено в табл. 3, в которой по каждому основному показателю (рис. 2–5) проведено их экспертное ранжирование. Исключены из сравнения такие характеристики, как достижимый перепад давления в ступени (для рассматриваемых типов РМОД он практически одинаков) и степень уравновешенности (рассматриваемые далее типы РМОД конструктивно уравновешиваемы). Представленные резуль-

таты достаточно условны, однако соответствуют действительной ситуации на рынке РМОД.

При оценке перспективных направлений создания отечественной компонентной базы РМОД для систем малой энергетики, холодильной и климатической техники необходимо, в том числе, исходить из того, что предполагаемый унифицированный типоразмерный ряд РМОД должен быть гарантированно востребован по меньшей мере на внутреннем рынке при таких объёмах производственных программ, которые бы обеспечивали экономическую целесообразность их производства [133]. Поэтому в нашем случае целесообразно рассматривать идею создания межотраслевой технологической компонентной базы, то есть типоразмерного ряда малоразмерных ротационных компрессорных и расширительных машин, востребованных при производстве широкого спектра энергопреобразующих установок малой мощности (тепловых насосов; установок рекуперации тепловых потерь; детандер-генераторов; холодильных и климатических систем; транспортных и контейнерных рефрижераторов; аккумуляторов давления, тепла и холода; систем термостабилизации и термостатирования технологических объектов; установок сушки, вакуумирования и т.п.).

С этой точки зрения, РМКР, имеющие ограниченный диапазон сверхмалых производительностей и мощностей, не могут рассматриваться в качестве перспективного базового компонента.

Конструкции ВМ и СПМ на сегодняшний день являются наиболее совершенными. Их характеристики близки к максимально достижимым для них показателям и дальнейшее, даже самое незначительное, улучшение этих характеристик возможно лишь на базе дорогостоящих технологий, разработка и освоение которых по силам лишь ведущим мировым компаниям.

Более простые и отчасти устаревшие лицензионные технологии реализуются в том числе российскими предприятиями [59, 62 и др.]; последнее поможет решить текущие проблемы нашего внутреннего рынка, однако не решит стратегических задач по обеспечению импортонезависимости РФ. Поэтому выбор ВМ и СПМ в качестве перспективной отечественной компонентной базы для малой энергетики, холодильной и климатической техники весьма сомнителен.

По результатам ранжирования РПМ занимает условное последнее место (табл. 3), однако, учитывая стратегическую потребность в отечественной компонентной базе для последующего создания конкурентоспособных технологических объектов с актуальными характеристиками и параметрами, проанализируем более детально перспективы РПМ на российском рынке.

Важнейшим преимуществом РПМ является их высокая технологичность: спецификация их базовой схемы включает в себя всего четыре наименования деталей простой конфигурации (корпус, ротор, подшипник, пластина), что обеспечивает их низкую себестоимость и возможность организации производства в сравнительно короткие сроки при незначительных инвестициях.

Имеющие место низкие показатели РПМ по быстроходности, величине нагрузок на элементы конструкции, потерям мощности на трение (табл. 3) требуют дополнительного пояснения:

— при абсолютной уравниваемости ротора РПМ его номинальные скоростные режимы не превышают 25...50 1/с; основная причина — недопустимое снижение механического КПД и интенсивный износ пластин при увеличении скорости вращения ротора;

— величина нагрузок на элементы конструкции РПМ определяется двумя составляющими: радиальными нагрузками на опорные подшипники, обусловленными действием поперечной газовой силы на ротор, и силой трения, действующей на периферийную кромку каждой пластины и требующей обеспечения их прочности и износостойкости; для решения этих проблем уже сейчас существуют перспективные конструктивные решения;

— основная причина повышенных потерь мощности на трение — наличие силы трения между пластиной и цилиндром при высокой скорости скольжения.

Таким образом, причина низкого уровня всех трёх характеристик практически одна — трение пластин в рабочей камере, снижением которого активно занимаются разработчики РМОД. Технологические преимущества и прогнозируемое снижение трения в рабочей камере являются основными предпосылками повышения конкурентоспособности РПМ в области малой энергетики, холодильной и климатической техники.

Заключение

В настоящее время на мировом и российском рынках наиболее востребованными типами ротационных компрессорных и расширительных машин объёмного действия для малой энергетики, холодильной техники и климатических систем являются пластинчато-статорные, спиральные, винтовые и ротационно-пластинчатые.

По техническому уровню наиболее совершенными конструкциями являются винтовые и спиральные, обладающие высокими удельными массогабаритными характеристиками и энергоэффективностью в широком диапазоне производительностей и рабочих давлений.

Наиболее массовой является конструкция пластинчато-статорных компрессоров для бытовых кондиционеров.

Основным преимуществом ротационно-пластинчатых машин является их высокая технологичность; при этом наиболее значимые конструктивные и эксплуатационные проблемы обусловлены трением пластин в рабочей камере. Результаты обзорного анализа научно-технических источников информации выявили возможные направления, реализация которых повысит конкурентоспособность ротационно-пластинчатых машин. По приближённой оценке, их быстроходность может увеличиться в 1,5...3 раза, а механический КПД — на 25...40 %. С учё-

Таблица 4. Условные обозначения и индексы
Table 4. Symbols and indexes

Обозначение	Наименование	Единица измерения
n_0	Частота вращения ротора	1/с
u_1	Окружная (периферийная) скорость ротора (пластин)	м/с
λ	Коэффициент подачи	
$\eta_{инг}$	Индикаторный КПД	
I_R	Радиальная сила, действующая при вращении неуравновешенных элементов роторов	Н
$G_{уд}$	Удельный вес	кг/кВт
$N_{тр}$	Потери мощности на трение	Вт
N^*	Суммарная величина потерь мощности	Вт
V_e	Производительность	м ³ /мин
ΔP	Разность давлений нагнетания и всасывания	МПа
F^*	Нагрузки, действующие на элементы конструкции ротационной машины	Н
Z^*	Доля конструктивных элементов повышенной сложности в общем количестве основных конструктивных элементов базовой схемы ротационной машины	
Z	Количество основных конструктивных элементов в базовой схеме ротационной машины	
РМОД	Ротационные машины объёмного действия	
ВМ: ВММ, ВМВ, ВМС	Винтовые компрессорные и расширительные машины: с подачей масла в рабочую камеру; с подачей воды в рабочую камеру; без подачи жидкости в рабочую камеру («сухого» типа)	
СПМ	Спиральные компрессорные и расширительные машины	
РПМ: РПММ, РПМС	Ротационно-пластинчатые компрессорные и расширительные машины: с подачей масла в рабочую камеру; без подачи жидкости в рабочую камеру («сухого» типа)	
РМКР	Пластинчато-статорные компрессорные и расширительные машины (ротационные машины с катящимся ротором)	
ТТМ	Ротационные компрессорные и расширительные машины трохлоидного типа	
РМНС	Ротационные компрессорные и расширительные машины с нелинейной синхронизацией роторов	

том этих предпосылок и необходимости обеспечения технологической безопасности и импортонезависимости можно предположить, что в ближайшей перспективе машины ротационно-пластинчатого типа станут наиболее предпочтительными для решения актуальных технико-экономических задач РФ в области малой энергетики, холодильной и климатической техники.

Список источников

1. Бушуев В. В., Громов А. И., Куричев Н. К. Энергетическая стратегия-2050: методология, вызовы, возможности. URL: <http://www.energystrategy.ru/> (дата обращения: 30.07.2022).
2. Громов А. И. Концепция энергетической стратегии России до 2050 года. URL: <https://cyberleninka.ru/article/kontseptsiya-energeticheskoy-strategii-rossii-na-period-do-2050-goda.pdf> (дата обращения: 30.07.2022).
3. Комитет Госдумы по энергетике подготовит предложение к Энергетической стратегии России на период до 2050 года. URL: <https://portnews.ru/> (дата обращения: 30.07.2022).
4. Кузнецова О. Р. Экономическая эффективность систем децентрализованного энергоснабжения: на примере Хабаровского края: дис. ... канд. экон. наук. Комсомольск-на Амуре, 2002. 180 с.
5. Малая атомная энергетика и автономные энергоисточники. URL: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/small-power-npp> (дата обращения: 03.08.2022).
6. Лукутин Б. В., Муравлёв И. О., Плотников И. А. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2015. 100 с.
7. Низкотемпературные ORC-модули. URL: <https://aquaecology.group/katalog/turbiny/> (дата обращения: 03.08.2022).
8. Технология ORC. URL: <http://altenergy.lv/ru/технология-orc/> (дата обращения: 02.08.2022).
9. НТЦ «Микротурбинные технологии». URL: <https://www.stc-mtt.com> (дата обращения: 03.08.2022).
10. Серков С. А., Грибин В. Г., Румянцев М. Ю. [и др.]. Распределенная генерация тепла и электричества для труднодоступных районов на основе инновационных паровых турбогенераторов // *Neftegaz.RU*. 2015. № 1-2. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/> (дата обращения: 23.07.2022).
11. Рассохин В. А., Забелин Н. А., Матвеев Ю. В. Основные направления развития микротурбинных технологий в России и за рубежом // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2011. № 4 (135). С. 41–51.
12. We engineer tomorrow to build a better future. URL: <https://www.danfoss.com> (дата обращения: 02.06.2022).
13. Climate technologies worldwide. URL: <https://www.climate.emerson.com> (дата обращения: 11.05.2022).
14. Эффективные решения для различных областей применения. URL: <https://www.bitzer.de/ru/ru/применения/> (дата обращения: 05.04.2022).
15. Engineering for a better world. URL: <https://www.gea.com> (дата обращения: 11.05.2022).
16. Global MYCOM. URL: <https://www.mayekawa.com> (дата обращения: 22.04.2022).
17. Состояние и перспективы развития холодильной отрасли России в 2022 году. URL: https://kriofrost.academy/press-center/articles/holodilnaya_tekhnika/ (дата обращения: 14.08.2022).
18. Бараненко А. В., Белозёров Г. А., Таганцев О. М. [и др.]. Состояние и перспективы развития холодильной отрасли России // *Холодильная техника*. 2009. Т. 98, № 3. С. 20–24.
19. Microturbine Technology — Capstone Green Energy Corporation. URL: <https://www.capstonegreenenergy.com> (дата обращения: 11.07.2022).
20. Ingersoll-Rand PowerWorks 70 kW microturbine. URL: <https://www.aaronequipment.com/usedequipment/generators/gas-turbine/ingersoll-rand-45686003> (дата обращения: 03.08.2022).
21. Микротурбины TURBEC. URL: <https://manbw.ru> (дата обращения: 02.08.2022).
22. Elliott Group. <https://www.elliott-turbo.com> (дата обращения: 22.04.2022).
23. TOYOTA TURBINE AND SYSTEMS INC. URL: <https://www.toyota-global.com> (дата обращения: 19.05.2022).
24. Андриющенко А. И. Основы термодинамики циклов тепло-энергетических установок. Москва: Высшая школа, 1968. 288 с.
25. ORC Screw Expander Power Plant. URL: http://2014_ksamppower-eng.kehch.com/ (дата обращения: 04.08.2022).
26. He J., Shi L., Tian H. [et al.]. Control strategy for a CO₂-based combined cooling and power generation system based on heat source and cold sink fluctuations. // *Energy*. 2022. Vol. 257. 124716. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124716.
27. Hoang A. T. Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle // *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 136–166. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.022.
28. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51, Issues 1-2. P. 711–722. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.10.017.
29. Li R., Yang Z., Duan Y. Design and operation of organic Rankine cycles for varied power load // *International Journal of Green Energy*. 2022. DOI: 10.1080/15435075.2022.2079948 (дата обращения: 04.08.2022).
30. Zhang Y., Guo T. S., Wu W. F. [et al.]. Simulation and optimisation of opened sewage concentration air cycle combined with the heat pump under actual weather conditions // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012060. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012060.
31. Wu Y.-T., Lei B., Ma C.-F. [et al.]. Study on the Characteristics of Expander Power Output Used for Offsetting Pumping Work Consumption in Organic Rankine Cycles // *Energy*. 2014. Vol. 7. P. 4957–4971. DOI: 10.3390/en7084957.
32. Khattar A., Assaad Z., Eugenio S. [et al.]. Experimental Simulation of a Heat Recovery Heat Pump System in Food Industries // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2010. 1087. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1087> (дата обращения: 18.06.22).
33. Thomas C., Margraf M., Stoeckel C. [et al.]. Implementation of scroll compressors into the Cordier diagram // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604. P. 012079. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012079.
34. Bao J., Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 24. P. 325–342. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.040.
35. Lemorta V., Guillaumea L., Legros A. [et al.]. A comparison of piston, screw and scroll expanders for smallscale rankine cycle systems // *The 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies*. URL: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/147369/1/p259v2.pdf> (дата обращения: 25.01.2021).
36. Alshammari F., Usman M., Pesyridis A. Expanders for Organic Rankine Cycle Technology / *Organic Rankine Cycle Technology for Heat Recovery* // ed. by E. Wang. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.78720.
37. Dumont O., Talluri L., Fiaschi D. [et al.]. Comparison of a scroll, a screw, a roots, a piston expander and a Tesla turbine for small-scale organic Rankine cycle // *5th International Seminar on ORC Power Systems*, September 9–11, Athens, Greece. 2019. 8 p. URL: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/239272/1/ORC2019-ExpanderComparisonTesla_reviewed_2.docx.pdf (дата обращения: 25.01.2021).
38. Żywica G., Kaczmarczyk T., Ichnatowicz E. Expanders for dispersed power generation: maintenance and diagnostics

problems // Transactions of the Institute of Fluid-flow Machinery. 2016. № 131. P.173–188. 39. Capata R., Pantano F. Expander design procedures and selection criterion for small rated organic rankine cycle systems // Energy Science Eng. 2020. Vol. 8. P. 3380–3414. DOI: 10.1002/ese3.710.

40. Сахун И. А. Винтовые компрессоры. Основы теории, расчёт, конструкция. Ленинград: Машиностроение, 1970. 400 с.

41. Grieb M., Brummer A. Investigation into the effects of surface condensation in steam-driven twin screw expanders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012044. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012044.

42. Smith I., Stosic N., Kovacevic A. Power Recovery from Low Grade Heat by Means of Screw Expanders. Publisher: Elsevier, 2014. 274 p. ISBN 9781782421900.

43. Nagam Seshaiah. Experimental and Computational Studies on Oil Injected Twin-Screw Compressor: a Thesis ... Doctor of Philosophy. Institute of Technology Rourkela, 2006. 195 p.

44. Ramchandran G., Harrison J. A Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160.

45. Nitulescu M., Slujitoru C., Petrescu V. [et al.]. Reducing rotors clearance — a way to increase the performance of a screw compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012196. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012196.

46. Expander generators. URL: <https://www.atlascopco.com/> (дата обращения: 05.08.2022).

47. Home of industrial ideas. URL: <https://www.atlascopco.com> (дата обращения: 12.04.2022).

48. KAESER around the world. URL: <https://www.kaeser.com/> (дата обращения: 05.08.2022).

49. Компрессорные системы. URL: <https://www.ingersollrand.com> (дата обращения: 08.08.2022).

50. Li G., Wu Y., Zhang Y. [et al.]. Performance Study on a Single-Screw Expander for a Small-Scale Pressure Recovery System // Energies. 2017. Vol. 10 (1). 6. DOI: 10.3390/en10010006.

51. Shen L., Wang W., Wu Y. [et al.]. Theoretical and experimental analyses of the internal leakage in single-screw expanders // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 86. P. 273–281. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.037.

52. Wang W., Wu Y. T., Ma C. F. [et al.]. Preliminary experimental study of single screw expander prototype // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31 (17). P. 3684–3688. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.019.

53. Wang Z., Wang H., Yan Q. [et al.]. Optimization study on multicolumn envelope meshing pair of single screw compressor based on leakage characteristics // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 92. 032. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.032.

54. Пронин В. А., Пекарев В. И. Однороторные винтовые компрессоры // Холодильная техника. 1982. № 10. С. 56–57.

55. Кузнецов Ю. Л. Совершенствование рабочей части однороторного винтового холодильного компрессора: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2002. 173 с.

56. Пронин В. А. Винтовые однородные компрессоры для холодильной техники и пневматики: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1998. 226 с.

57. Юша В. Л. Повышение экономичности и безопасности работы винтового компрессора с газожидкостным рабочим телом: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1987. 273 с.

58. Докукин В. Н. Оценка эффективности работы винтового компрессора с новым профилем зуба: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 141 с.

59. Челябинский компрессорный завод. URL: <https://www.chkz.ru/> (дата обращения: 07.08.2022).

60. Пензкомпрессормаш — наш опыт — Ваш правильный выбор. URL: <http://www.pkm.ru/catalog/gazovye-kompressory-vintovoye/> (дата обращения: 07.08.2022).

61. АО Компрессор. URL: <http://compressor.spb.ru/vintovii.html> (дата обращения: 07.08.2022).

62. Краснодарский компрессорный завод. URL: <https://kkzav.ru/> (дата обращения: 07.08.2022).

63. Решения по сжатию воздуху и промышленным газам. URL: <https://zif.su/> (дата обращения: 08.08.2022).

64. Song P., Shi L., Ma C. A review of scroll expanders for organic Rankine cycle systems // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 75. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.094.

65. Ayachi F., Ksayer E. B., Neveu P. [et al.]. Experimental investigation and modeling of a hermetic scroll expander // Applied Energy. 2016. Vol. 181. P. 256–267. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.030.

66. Lemort V., Teodorescu Ion V., Lebrun J. Experimental Study of the Integration of a Scroll Expander Into a Heat Recovery Rankine Cycle // International Compressor Engineering Conference. 2006. 1771. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/1771> (дата обращения: 07.06.2022).

67. Emhardt S., Tian G., Chew J. Heat release modelling of a range extender scroll engine // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 2039–2045. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.470.

68. Tanveer M. M., Bradshaw C. R. Performance evaluation of low-GWP refrigerants in 1-100 ton scroll compressors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012138.

69. Ji L., He Z., Han Y. [et al.]. Investigation on the Performance Improvement of the Scroll Compressor by DLC F // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012078.

70. Fukuta M., Yanagisawa T., Kosuda O. [et al.]. Performance of scroll expander for CO₂ refrigeration cycle // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2006. 1768. P. 1–9. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2767&context=icesc> (дата обращения: 17.07.2022).

71. Nagata H., Kakuda M., Sekiya S. [et al.]. Development of a scroll expander for the CO₂ refrigeration cycle. International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2010. 1952. Vol. 1157. P. 1–7. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2951&context=icesc> (дата обращения: 17.07.2022).

72. Покрывает MODENGY применяются для увеличения ресурса спиральных компрессоров. URL: <https://modengy.ru/> (дата обращения: 22.08.2022).

73. Kohsokabe H., Koyama M., Tojo K. [et al.]. Performance characteristics of scroll expander for CO₂ refrigeration cycles // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2008. Vol. 1239. P. 1–8. 1847. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2846&context=icesc> (дата обращения: 17.07.2022).

74. Fadiga E., Casari N., Angel B. [et al.]. Flow computation inside a scroll compressor based on open-source code // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012167. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012167.

75. АО «Вакууммаш»: вакуумное оборудование от разработки до производства. URL: <https://vacma.ru/> (дата обращения: 09.08.2022).

76. Головинцев А. Г., Румянцев В. А., Ардашев В. И. [и др.]. Ротационные компрессоры. Москва: Машиностроение, 1964. 315 с.

77. Райковский Н. А., Юша В. Л., Корнев В. А., Кузнецов К. И., Карпусь В. С. Анализ механических потерь в рабочей камере ротационно-пластинчатых машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 1. С. 23–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-23-32.

78. Murthy A. A. Investigation of a Four-Intersecting-Vane Rotary Expander in a Vapour Compression Refrigeration System: a Thesis ... Doctor of Philosophy. University of Auckland, 2022. 357 p.

79. Kolasiński P. The Influence of the Heat Source Temperature on the Multivane Expander Output Power in an

- Organic Rankine Cycle (ORC) System // *Energies* 2015. Vol. 8. P. 3351 – 3369. DOI: 10.3390/en8053351.
80. Costanzo I., Murgia S., Valenti G. [et al.]. Experimental Investigation on a Sliding-Vane Expander for Steam Applications // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012031.
81. Sarip A. R., Musa M. N. Performance evaluation of a rotating sleeve vane compressor // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012068. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012068.
82. Chen Q. J., Ooi K. T. Geometric Optimisation of a Coupled Vane Compressor // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012151. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012151.
83. Hu Y. S., Wei H. J., Xu J. [et al.]. Design Improvements of Vane Bearing Compressor // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012031.
84. Naseri A., Norris S., Subiantoro A. Friction and leakage analysis of the blocker-type valve designed for a revolving vane expander // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012083. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012083.
85. Fukuta M., Yanagisawa T., Higashiyama M. [et al.]. Performance of vane-type CO₂ expander and characteristics of transcritical expansion process // *HVAC&R Research*. 2009. Vol. 15 (4). P. 711 – 727. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390859.
86. Yang B., Peng X., He Z. [et al.]. Experimental investigation on the internal working process of a CO₂ rotary vane expander // *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29 (11-12). P. 2289 – 2296. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.11.023.
87. Zhang X., Pu B., Guo L. [et al.]. Improved rotary vane expander for transcritical CO₂ cycle by introducing high-pressure gas into the vane slots // *Journal of Refrigeration*. 2011. Vol. 34 (3). P. 732 – 741. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2010.12.005.
88. Wang M., Zhao Y., Cao F. [et al.]. Simulation study on a novel vane-type expander with internal two-stage expansion process for R-410A refrigeration system // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35 (4). P. 757 – 771. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2011.11.014.
89. Xia C., Zhang W., Bu G. [et al.]. Experimental study on a sliding vane expander in the HFC410A refrigeration system for energy recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 59 (1-2). P. 559 – 567. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.05.050.
90. Subiantoro A., Ooi K. T. Analysis of the revolving vane (RV-0) expander, Part 1: Experimental investigations // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35 (6). P. 734 – 1743. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2012.04.015.
91. Murgia S., Valenti G., Costanzo I. [et al.]. Optimization of sliding-vane expanders for a low-enthalpy ORC energy recovery system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012042.
92. Промышленные компрессоры Mattei. URL: <http://www.mattei-it.ru/kompressor/> (дата обращения: 26.04.2022).
93. Mapner — Pneumatic Rotary Pump Manufacturer. URL: <https://en.mapner.com> (дата обращения: 06.08.2022).
94. Vacuum pumps — DVP Vacuum Technology. URL: <https://www.dvppumps.com/en/> (дата обращения: 06.08.2022).
95. Discover vacuum pumps and compressors from BECKER. URL: <https://beckerpumps.com/> (дата обращения: 06.08.2022).
96. Rotary Vane Compressors — Hydrovane — CompAir. URL: <https://www.compair.com/en-pk/vane-compressors> (дата обращения: 06.08.2022).
97. TORAD's spool compressor. URL: <http://toradengineering.com/> (дата обращения: 26.04.2022).
98. Orosz J., Kemp G., Bradshaw C. [et al.]. Performance and Operating Characteristics of a Novel Rotating Spool Compressor // *International Compressor Engineering Conference*. 2012. 2078. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2078> (дата обращения: 26.04.2022).
99. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Influence of Volumetric Displacement and Aspect Ratio on the Performance Metrics of the Rotating Spool Compressor // *International Compressor Engineering Conference*. 2014. 2270. <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2270> (дата обращения: 26.04.2022).
100. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Loss Analysis of Rotating Spool Compressor Based on High Speed Pressure Measurements // *International Compressor Engineering Conference*. 2014. 2271. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2271> (дата обращения: 20.03.2022).
101. Orosz J., Bradshaw C. R., Kemp G. [et al.]. An update on the Performance and Operating Characteristics of a Novel Rotating Spool Compressor // *International Compressor Engineering Conference*. 2014. 2327. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2327> (дата обращения: 20.03.2022).
102. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Design Methodology Improvements of a Rotating Spool Compressor using a Comprehensive Model // *International Compressor Engineering Conference*. 2016. 2466. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2466> (дата обращения: 14.04.2022).
103. Ro-Flo — Installation, Operation, and Maintenance Manual. URL: <https://roflocompressors.com> (дата обращения: 06.12.2021).
104. Compressors — CVS Engineering. URL: <https://www.cvs-eng.de/en/public-transportation/compressors/> (дата обращения: 06.08.2022).
105. Компрессор роторно-пластинчатый КИТ АЭРО РЛ. URL: <https://www.smz.su/produksiya/kompressora-ivozduhoduvki/vakuumnye-kompressory/> (дата обращения: 06.08.2022).
106. Роторно-пластинчатый компрессор ПАО НПО «Искра». URL: <https://www.tek-all.ru/> (дата обращения: 06.08.2022).
107. Производство компрессорного и насосного оборудования. URL: <https://tehprom-k.ru/o-kompanii/> (дата обращения: 15.08.2022).
108. Xu J., Yu B., Yang O. X. [et al.]. Research on motion and friction of rolling piston in rotary compressor // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012047.
109. Zhong H., Li X., Yang X. Study on leakage loss via the radial clearance in a double-swing vane compressor for electric vehicle air conditioning systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012084.
110. Li M., Ma Y., Tian H. A rolling piston-type two-phase expander in the transcritical CO₂ cycle // *HVAC&R Research*. 2011. Vol. 15 (4). P. 729 – 741. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390860.
111. Sakitani K., Moriwaki M., Okamoto M. Development of two-phase flow expander for CO₂ heat pump and air-conditioners // *The 8th IEA Heat Pump Conference at Las Vegas*. 2005. P. 1 – 8. URL: <https://iifir.org/en/fridoc/development-of-two-phase-flow-expander-for-co2-heat-pumps-and-air-22974> (дата обращения: 14.04.2022).
112. Yang J., Zhang L., Yuan Li H. Development of a two-cylinder rolling piston CO₂ expander // *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. 2010. Vol. 1411. P. 1 – 5. 2022. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icesc/2022/> (дата обращения: 14.04.2022).
113. Hu J., Li M., Zhao Li. Improvement and experimental research of CO₂ two-rolling piston expander // *Energy*. 2015. Vol. 93. P. 2199 – 2207. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.097.
114. Компрессоры для тепловых насосов. URL: <https://solarsoul.net/kompressory-dlya-teplovyx-nasosov> (дата обращения: 20.08.2022).
115. Зеликовский И. X., Каплан Л. Г. Малые холодильные машины и установки: справ. Москва: Агропромиздат, 1989. 672 с.

116. Leemhuis R. S., Soedel W. Kinematics of Wankel Compressors (or Engines) by Way of Vector Loops // International Compressor Engineering Conference. Purdue. 1976. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/228> (дата обращения: 20.08.2022).

117. Mazda и роторный двигатель Ванкеля. URL: <https://naukatehnika.com/mazda-i-rotornyj-dvigatel-vankelya.html> (дата обращения: 08.08.2022).

118. Beard J. E. Epitrochoidal Versus Hypotrochoidal Gerotor Type Pumps With Special Attention to Rubbing Velocities // International Compressor Engineering Conference. 1988. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/656> (дата обращения: 20.08.2022).

119. Read M. Basic design procedure for an internally geared screw compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012055.

120. Сухомлинов Р. М. Трохоидные роторные компрессоры. Харьков: Вища школа, 1975. 151 с.

121. Бениович В., Апазиди Г., Бойко А. Роторпоршневые двигатели. Москва: Машиностроение, 1968. 151 с.

122. Предприятие по производству трохойдных компрессоров. URL: <https://www.invest-ngo44.ru/> (дата обращения: 08.08.2022).

123. Heng K. R., Ooi K. T., Chan W. K. Experimental study of an oil-free swing vane compressor // International Journal of Refrigeration. 2022. Vol. 134. P. 95–104. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.028.

124. Xia C., Zhang Z., Huang G. [et al.]. Study on the new hybrid thermodynamic cycle for an improved micro swing engine with heat recovery process // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 129. P. 1135–1149. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.123.

125. Борисенко А. В. Разработка и исследование роторного холодильного компрессора с секторными поршнями: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2020. 175 с.

126. Юша В. Л. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объемного действия для автономных мобильных установок: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2008. 434 с.

127. Jungbluth G. Rotation's kolbenmaschinen nach Wankel und ander Bekannte Bauarten // Maschinenmarkt. 1975. Vol. 81, № 35. P. 33–37.

128. Cui B., Becker K., Lüdersen U. A study on the kinematics of a new Schukey-type rotary compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012056.

129. Мировой рынок компрессоров в 2022 году. URL: <https://apic.ru/about/apic-news/5742/> (дата обращения: 20.08.2022).

130. BITZER создаёт центр компетенций по роторным компрессорам и совместное предприятие с партнёрами в Китае. URL: <https://www.holodinfo.ru/news/bitzer/> (дата обращения: 20.08.2022).

131. Технологическая конкуренция и национальная безопасность. Война только начинается. URL: <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/voyna-tolko-nachinaetsya/> (дата обращения: 22.08.2022).

132. Горда А. С. Развитие глобальной конкуренции стран в мирохозяйственной системе // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. 2018. Т. 4 (70), № 4. С. 46–55.

133. Дайнеко А. Е., Данильченко А. В., Глубокий С. В. [и др.]. Международная конкурентоспособность реального сектора экономики Беларуси / под ред. А. Е. Дайнеко. Минск: Изд-во БНТУ, 2020. 228 с.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), Омский государственный технический университет, г. Омск.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Адрес для переписки: 1978yusha@mail.ru

ГРОМОВ Антон Юрьевич, заместитель генерального директора по гражданской продукции АО НТК «Криогенная техника», г. Омск.

Адрес для переписки: azot111@bk.ru

ПОТАПОВ Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный специалист департамента по развитию и новым технологиям АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

Для цитирования

Юша В. Л., Громов А. Ю., Потапов Ю. А. Анализ перспективных направлений создания отечественной компонентной базы ротационных машин объемного действия для малой энергетики, холодильной и климатической техники // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 4. С. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022 г.

© В. Л. Юша, А. Ю. Громов, Ю. А. Потапов

THE ANALYSIS OF PROMISING DIRECTIONS FOR CREATION OF DOMESTIC COMPONENT BASE OF VOLUMETRIC ROTARY MACHINES FOR LOW POWER ENERGY, REFRIGERATION AND CLIMATE TECHNOLOGY

V. L. Yusha¹, A. Yu. Gromov², Yu. A. Potapov³

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²JSC Scientific and Technical Complex «Cryogenic Technique»,
Russia, Omsk, 22 Parts'ezda str., bld. 97/1, 644105

³JSC Group of Companies «Titan»,
Russia, Omsk, Gubkin Ave., 30, 644035

An overview analysis of research and development in the field of volumetric rotary machines for low power energy, refrigeration and climate technology, as well as the state of the world and Russian market of compressor and expansion machines of this type is presented. It is shown that in this sector of domestic industry, the existing level and scale of production does not meet the requirements of ensuring the technological independence of the Russian Federation and the implementation of critical technologies.

The analysis of the existing designs of rotary machines, as well as the nomenclature of domestic refrigeration and compressor engineering, allowed us to conclude that rotary machines of screw and spiral type are preferred for the implementation of existing licensed technologies at Russian enterprises. However, taking into account the urgency of ensuring import independence, rotary-plate compressor and expansion machines are of considerable interest. The prerequisites for improving the technical level and competitiveness of rotary-plate machines based on domestic technologies and new promising technical solutions are identified and formulated.

Keywords: volumetric rotary machines, compressors, expansion machines, competitiveness, low power energy, refrigeration, climate systems, characteristics, ranking.

References

1. Bushuev V. V., Gromov A. I., Kurichev N. K. Energeticheskaya strategiya-2050: metodologiya, vyzovy, vozmozhnosti [Energy Strategy 2050: Methodology, Challenges, Opportunities]. URL: <http://www.energystrategy.ru/> (accessed: 30.07.2022). (In Russ.).
2. Gromov A. I. Kontsepsiya energeticheskoy strategii Rossii do 2050 goda [The concept of the energy strategy of Russia until 2050]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/kontsepsiya-energeticheskoy-strategii-rossii-na-period-do-2050-goda.pdf> (accessed: 30.07.2022). (In Russ.).
3. Komitet Gosdumy po energetike podgotovit predlozheniya k Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2050 goda [The State Duma Committee on Energy will prepare proposals for the Energy Strategy of Russia for the period up to 2050]. URL: <https://portnews.ru/> (accessed: 30.07.2022). (In Russ.).
4. Kuznetsova O. R. Ekonomicheskaya effektivnost' sistem detsentralizovannogo energosnabzheniya: na primere Khabarovskogo kraja [Economic efficiency of decentralized energy supply systems: on the example of the Khabarovsk Territory]. Komsomolsk-on-Amur, 2002. 180 p. (In Russ.).
5. Malaya atomnaya energetika i avtonomnyye energoistochniki [Small nuclear power and autonomous energy sources]. URL: <https://www.ippe.ru/nuclear-power/small-power-npp> (accessed: 03.08.2022). (In Russ.).
6. Lukutin B. V., Muravlev I. O., Plotnikov I. A. Detsentralizovannyye sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami [Decentralized power supply systems with wind and solar power plants]. Tomsk, 2015. 100 p. (In Russ.).
7. Nizkotemperaturnyye ORC-moduli [Low Temperature ORC Modules]. URL: <https://aquaecology.group/katalog/turbiny/> (accessed: 03.08.2022). (In Russ.).
8. Tekhnologiya ORC [ORC Technology]. URL: <http://altenergy.lv/ru/технология-orc/> (accessed: 02.08.2022). (In Russ.).
9. NTTS «Mikroturbinnyye tekhnologii» [STC «Microturbine Technologies»]. URL: <https://www.stc-mtt.com> (accessed: 03.08.2022). (In Russ.).
10. Serkov S. A., Gribin V. G., Rumyantsev M. Yu. [et al.]. Raspredeennaya generatsiya tepla i elektrichstva dlya trudnodostupnykh rayonov na osnove innovatsionnykh parovykh turbogeneratorov [Distributed generation of heat and electricity for remote areas based on innovative steam turbine generators] // *Neftgaz.RU. Neftgaz.RU*. 2015. No. 1-2. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/> (accessed: 23.07.2022). (In Russ.).
11. Rassokhin V. A., Zabelin N. A., Matveyev Yu. V. Osnovnyye napravleniya razvitiya mikroturbinnykh tekhnologiy v Rossii i za rubezhom [The main directions of development of microturbine technologies in Russia and abroad] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye. St. Petersburg Polytechnical University Journal. Science and Education*. 2011. No. 4 (135). P. 41–51. (In Russ.).
12. We engineer tomorrow to build a better future. URL: <https://www.danfoss.com> (accessed: 02.06.2022). (In Engl.).
13. Climate technologies worldwide. URL: <https://www.climate.emerson.com> (accessed: 11.05.2022). (In Engl.).
14. Effektivnyye resheniya dlya razlichnykh oblastey primeneniya [Efficient solutions for various applications].

URL: <https://www.bitzer.de/ru/ru/применения/> (accessed: 05.04.2022). (In Russ.).

15. Engineering for a better world. URL: <https://www.gea.com> (accessed: 11.05.2022). (In Engl.).

16. Global MYCOM. URL: <https://www.mayekawa.com> (accessed: 22.04.2022). (In Engl.).

17. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya kholodil'noy otrasli Rossii v 2022 godu [The state and prospects for the development of the refrigeration industry in Russia in 2022]. URL: https://kriofrost.academy/press-center/articles/holodil'naya_tekhnika/ (accessed: 14.08.2022). (In Russ.).

18. Baranenko A. V., Belozherov G. A., Tagantsev O. M. [et al.]. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya kholodil'noy otrasli Rossii [State and prospects for the development of the refrigeration industry in Russia] // *Kholodil'naya tekhnika. Kholodil'naya Tekhnika*. 2009. Vol. 98, no. 3. P. 20–24. (In Russ.).

19. Microturbine Technology — Capstone Green Energy Corporation. URL: <https://www.capstonegreenenergy.com> (accessed: 11.07.2022). (In Engl.).

20. Ingersoll-Rand PowerWorks 70 kW microturbine. URL: <https://www.aaronequipment.com/usedequipment/generators/gas-turbine/ingersoll-rand-45686003> (accessed: 03.08.2022). (In Engl.).

21. Mikroturbiny TURBEC [TURBEC microturbines]. URL: <https://manbw.ru> (accessed: 02.08.2022). (In Engl.).

22. Elliott Group. URL: <https://www.elliott-turbo.com> (accessed: 22.04.2022). (In Engl.).

23. TOYOTA TURBINE AND SYSTEMS INC. URL: <https://www.toyota-global.com> (accessed: 19.05.2022). (In Engl.).

24. Andryushchenko A. I. Osnovy termodinamiki tsiklov teploenergeticheskikh ustanovok [Fundamentals of thermodynamics of cycles of thermal power plants]. Moscow, 1968. 288 p. (In Russ.).

25. ORC Screw Expander Power Plant. URL: http://2014_ks-ampower-eng.kehch.com/ (accessed: 04.08.2022). (In Engl.).

26. He J., Shi L., Tian H. [et al.]. Control strategy for a CO₂-based combined cooling and power generation system based on heat source and cold sink fluctuations. // *Energy*. 2022. Vol. 257. 124716. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124716. (In Engl.).

27. Hoang A. T. Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle // *Applied Energy*. 2018. Vol. 231. P. 136–166. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.022. (In Engl.).

28. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51, Issues 1-2. P. 711–722. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.10.017. (In Engl.).

29. Li R., Yang Z., Duan Y. Design and operation of organic Rankine cycles for varied power load // *International Journal of Green Energy*. 2022. DOI: 10.1080/15435075.2022.2079948 (accessed: 04.08.2022). (In Engl.).

30. Zhang Y., Guo T. S., Wu W. F. [et al.]. Simulation and optimization of opened sewage concentration air cycle combined with the heat pump under actual weather conditions // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012060. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012060. (In Engl.).

31. Wu Y.-T., Lei B., Ma C.-F. [et al.]. Study on the Characteristics of Expander Power Output Used for Offsetting Pumping Work Consumption in Organic Rankine Cycles // *Energy*. 2014. Vol. 7. P. 4957–4971. DOI: 10.3390/en7084957. (In Engl.).

32. Khattar A., Assaad Z., Eugenio S. [et al.]. Experimental Simulation of a Heat Recovery Heat Pump System in Food Industries // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2010. 1087. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1087> (accessed: 18.06.22). (In Engl.).

33. Thomas C., Margraf M., Stoeckel C. [et al.]. Implementation of scroll compressors into the Cordier diagram // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604. P. 012079. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012079. (In Engl.).

34. Bao J., Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 24. P. 325–342. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.040. (In Engl.).

35. Lemorta V., Guillaume L., Legros A. [et al.]. A comparison of piston, screw and scroll expanders for smallscale rankine cycle systems // *The 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies*. URL: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/147369/1/p259v2.pdf> (accessed: 25.01.2021). (In Engl.).

36. Alshammari F., Usman M., Pesyridis A. Expanders for Organic Rankine Cycle Technology / Organic Rankine Cycle Technology for Heat Recovery // ed. by E. Wang. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.78720. (In Engl.).

37. Dumont O., Talluri L., Fiaschi D. [et al.]. Comparison of a scroll, a screw, a roots, a piston expander and a Tesla turbine for small-scale organic Rankine cycle // *5th International Seminar on ORC Power Systems*, September 9–11, Athens, Greece. 2019. 8 p. URL: https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/239272/1/ORC2019-ExpanderComparisonTesla_reviewed_2.docx.pdf (accessed: 25.01.2021). (In Engl.).

38. Żywica G., Kaczmarczyk T., Ihnatowicz E. Expanders for dispersed power generation: maintenance and diagnostics problems // *Transactions of the Institute of Fluid-flow Machinery*. 2016. No. 131. P. 173–188. (In Engl.).

39. Capata R., Pantano F. Expander design procedures and selection criterion for small rated organic rankine cycle systems // *Energy Science Eng.* 2020. Vol. 8. P. 3380–3414. DOI: 10.1002/ese3.710. (In Engl.).

40. Sakun I. A. Vintovyye kompressory. Osnovy teorii, raschet, konstruktsiya [Screw compressors. Fundamentals of theory, calculation, design]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1970. 400 p. (In Russ.).

41. Grieb M., Brummer A. Investigation into the effects of surface condensation in steam-driven twin screw expanders // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012044. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012044. (In Engl.).

42. Smith I., Stosic N., Kovacevic A. Power Recovery from Low Grade Heat by Means of Screw Expanders. Publisher: Elsevier, 2014. 274 p. ISBN 9781782421900. (In Engl.).

43. Nagam Seshaiiah. Experimental and Computational Studies on Oil Injected Twin-Screw Compressor: a Thesis ... Doctor of Philosophy. Institute of Technology Rourkela, 2006. 195 p. (In Engl.).

44. Ramchandran G., Harrison J. A Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160. (In Engl.).

45. Nitulescu M., Slujitoru C., Petrescu V. [et al.]. Reducing rotors clearance — a way to increase the performance of a screw compressor // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012196. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012196. (In Engl.).

46. Expander generators. URL: <https://www.atlascopco.com/> (accessed: 05.08.2022). (In Engl.).

47. Home of industrial ideas. URL: <https://www.atlascopco.com> (accessed: 12.04.2022). (In Engl.).

48. KAESER around the world. URL: <https://www.kaeser.com/> (accessed: 05.08.2022). (In Engl.).

49. Kompessornyye sistemy [Compressor systems]. URL: <https://www.ingersollrand.com> (accessed: 08.08.2022). (In Russ.).

50. Li G., Wu Y., Zhang Y. [et al.]. Performance Study on a Single-Screw Expander for a Small-Scale Pressure Recovery System // *Energies*. 2017. Vol. 10 (1). 6. DOI: 10.3390/en10010006. (In Engl.).

51. Shen L., Wang W., Wu Y. [et al.]. Theoretical and experimental analyses of the internal leakage in single-screw

- expanders // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 86. P. 273–281. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.037. (In Engl.).
52. Wang W., Wu Y. T., Ma C. F. [et al.]. Preliminary experimental study of single screw expander prototype // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31 (17). P. 3684–3688. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.019. (In Engl.).
53. Wang Z., Wang H., Yan Q. [et al.]. Optimization study on multicolumn envelope meshing pair of single screw compressor based on leakage characteristics // International Journal of Refrigeration. 2018. Vol. 92. 032. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.032. (In Engl.).
54. Pronin V. A., Pekarev V. I. Odnorotornyye vintovyye kompressory [Single-rotor screw compressors] // Kholodil'naya tekhnika. *Kholodil'naya Tekhnika*. 1982. No. 10. P. 56–57. (In Russ.).
55. Kuznetsov Yu. L. Sovershenstvovaniye rabochey chasti odnorotornogo vintovogo kholodil'nogo kompressora [Improvement of the working part of a single-rotor screw refrigeration compressor]. St. Petersburg, 2002. 173 p. (In Russ.).
56. Pronin V. A. Vintovyye odnorodnyye kompressory dlya kholodil'noy tekhniki i pnevmatiki [Screw homogeneous compressors for refrigeration and pneumatics]. St. Petersburg, 1998. 226 p. (In Russ.).
57. Yusha V. L. Povysheniye ekonomichnosti i bezopasnosti raboty vintovogo kompressora s gazozhidkostnym rabochim telom [Improving the efficiency and safety of the screw compressor with a gas-liquid working fluid.]. Omsk, 1987. 273 p. (In Russ.).
58. Dokukin V. N. Otsenka effektivnosti raboty vintovogo kompressora s novym profilem zuba [Evaluation of the efficiency of a screw compressor with a new tooth profile]. St. Petersburg, 2014. 141 p. (In Russ.).
59. Chelyabinskiy kompressornyy zavod [Chelyabinsk Compressor Plant]. URL: <https://www.chkz.ru/> (accessed: 07.08.2022). (In Russ.).
60. Penzkompessor mash — nash opyt — Vash pravil'nyy vybor [Penzkompessor mash — our experience — your right choice]. URL: <http://www.pkm.ru/catalog/gazovye-kompressory-vintovoye/> (accessed: 07.08.2022). (In Russ.).
61. AO Kompessor [JSC Compressor]. URL: <http://compressor.spb.ru/vintovii.html> (accessed: 07.08.2022). (In Russ.).
62. Krasnodarskiy kompressornyy zavod [Krasnodar Compressor Plant]. URL: <https://kkzav.ru/> (accessed: 07.08.2022). (In Russ.).
63. Resheniya po szhatomu vozdukhу i promyshlennym gazam [Solutions for compressed air and industrial gases]. URL: <https://zif.su> (accessed: 08.08.2022). (In Russ.).
64. Song P., Shi L., Ma C. A review of scroll expanders for organic Rankine cycle systems // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 75. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.094. (In Engl.).
65. Ayachi F., Ksayer E. B., Neveu P. [et al.]. Experimental investigation and modeling of a hermetic scroll expander // Applied Energy. 2016. Vol. 181. P. 256–267. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.030. (In Engl.).
66. Lemort V., Teodorese Ion V., Lebrun J. Experimental Study of the Integration of a Scroll Expander into a Heat Recovery Rankine Cycle // International Compressor Engineering Conference. 2006. 1771. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/1771> (accessed: 07.06.2022). (In Engl.).
67. Emhardt S., Tian G., Chew J. Heat release modelling of a range extender scroll engine // Energy Procedia. 2019. Vol. 158. P. 2039–2045. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.470. (In Engl.).
68. Tanveer M. M., Bradshaw C. R. Performance evaluation of low-GWP refrigerants in 1-100 ton scroll compressors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012138. (In Engl.).
69. Ji L., He Z., Han Y. [et al.]. Investigation on the Performance Improvement of the Scroll Compressor by DLC F // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012078. (In Engl.).
70. Fukuta M., Yanagisawa T., Kosuda O. [et al.]. Performance of scroll expander for CO₂ refrigeration cycle // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2006. 1768. P. 1–9. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2767&context=icec> (accessed: 17.07.2022). (In Engl.).
71. Nagata H., Kakuda M., Sekiya S. [et al.]. Development of a scroll expander for the CO₂ refrigeration cycle. International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2010. 1952. Vol. 1157. P. 1–7. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2951&context=icec> (accessed: 17.07.2022). (In Engl.).
72. Pokrytiya MODENGY primenyayutsya dlya uvelicheniya resursa spiral'nykh kompressorov [MODENGY coatings are used to increase the life of scroll compressors]. URL: <https://modengy.ru/> (accessed: 22.08.2022). (In Russ.).
73. Kohsokabe H., Koyama M., Tojo K. [et al.]. Performance characteristics of scroll expander for CO₂ refrigeration cycles // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2008. Vol. 1239. P. 1–8. 1847. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2846&context=icec> (accessed: 17.07.2022). (In Russ.).
74. Fadiga E., Casari N., Angel B. [et al.]. Flow computation inside a scroll compressor based on open-source code // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012167. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012167. (In Engl.).
75. AO «Vakuummash»: vakuumnoye oborudovaniye ot razrabotki do proizvodstva [JSC «Vakuummash»: vacuum equipment from development to production]. URL: <https://vacma.ru/> (accessed: 09.08.2022). (In Russ.).
76. Golovintsev A. G., Rumyantsev V. A., Ardashev V. I. [et al.]. Rotatsionnyye kompressory [Rotary compressors]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1964. 315 p. (In Russ.).
77. Raykovskiy N. A., Yusha V. L., Korenev V. A., Kuznetsov K. I., Karpus' V. S. Analiz mekhanicheskikh poter' v rabochey kamere rotatsionno-plastinchatykh mashinakh [Analysis of mechanical losses in working chamber of rotary vane machines] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 23–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-23-32. (In Russ.).
78. Murthy A. A. Investigation of a Four-Intersecting-Vane Rotary Expander in a Vapour Compression Refrigeration System: a Thesis ... Doctor of Philosophy. University of Auckland, 2022. 357 p. (In Engl.).
79. Kolasiński P. The Influence of the Heat Source Temperature on the Multivane Expander Output Power in an Organic Rankine Cycle (ORC) System // Energies 2015. Vol. 8. P. 3351–3369. DOI: 10.3390/en8053351. (In Engl.).
80. Costanzo I., Murgia S., Valenti G. [et al.]. Experimental Investigation on a Sliding-Vane Expander for Steam Applications // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012031. (In Engl.).
81. Sarip A. R., Musa M. N. Performance evaluation of a rotating sleeve vane compressor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012068. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012068. (In Engl.).
82. Chen Q. J., Ooi K. T. Geometric Optimization of a Coupled Vane Compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012151. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012151. (In Engl.).
83. Hu Y. S., Wei H. J., Xu J. [et al.]. Design Improvements of Vane Bearing Compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012031. (In Engl.).
84. Naseri A., Norris S., Subiantoro A. Friction and leakage analysis of the blocker-type valve designed for a revolving vane expander // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012083. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012083. (In Engl.).

85. Fukuta M., Yanagisawa T., Higashiyama M. [et al.]. Performance of vane-type CO₂ expander and characteristics of transcritical expansion process // HVAC&R Research. 2009. Vol. 15 (4). P. 711–727. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390859. (In Engl.).

86. Yang B., Peng X., He Z. [et al.]. Experimental investigation on the internal working process of a CO₂ rotary vane expander // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29 (11-12). P. 2289–2296. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.11.023. (In Engl.).

87. Zhang X., Pu B., Guo L. [et al.]. Improved rotary vane expander for transcritical CO₂ cycle by introducing high-pressure gas into the vane slots // Journal of Refrigeration. 2011. Vol. 34 (3). P. 732–741. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.12.005. (In Engl.).

88. Wang M., Zhao Y., Cao F. [et al.]. Simulation study on a novel vane-type expander with internal two-stage expansion process for R-410A refrigeration system // International Journal of Refrigeration. 2012. Vol. 35 (4). P. 757–771. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.11.014. (In Engl.).

89. Xia C., Zhang W., Bu G. [et al.]. Experimental study on a sliding vane expander in the HFC410A refrigeration system for energy recovery // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 59 (1-2). P. 559–567. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.05.050. (In Engl.).

90. Subiantoro A., Ooi K. T. Analysis of the revolving vane (RV-0) expander, Part 1: Experimental investigations // International Journal of Refrigeration. 2012. Vol. 35 (6). P. 734–743. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.04.015. (In Engl.).

91. Murgia S., Valenti G., Costanzo I. [et al.]. Optimization of sliding-vane expanders for a low-enthalpy ORC energy recovery system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012042. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012042. (In Engl.).

92. Promyshlennyye kompressory Mattei [Mattei Industrial Compressors]. URL: <http://www.mattei-it.ru/kompressor/> (accessed: 26.04.2022). (In Russ.).

93. Mapner — Pneumatic Rotary Pump Manufacturer. URL: <https://en.mapner.com> (accessed: 06.08.2022). (In Engl.).

94. Vacuum pumps — DVP Vacuum Technology. URL: <https://www.dvppumps.com/en/> (accessed: 06.08.2022). (In Engl.).

95. Discover vacuum pumps and compressors from BECKER. URL: <https://beckerpumps.com/> (accessed: 06.08.2022). (In Engl.).

96. Rotary Vane Compressors — Hydrovane — CompAir. URL: <https://www.compair.com/en-pk/vane-compressors> (accessed: 06.08.2022).

97. TORAD's spool compressor. URL: <http://toradengineering.com/> (accessed: 26.04.2022). (In Engl.).

98. Orosz J., Kemp G., Bradshaw C. [et al.]. Performance and Operating Characteristics of a Novel Rotating Spool Compressor // International Compressor Engineering Conference. 2012. 2078. 9 p. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2078> (accessed: 26.04.2022). (In Engl.).

99. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Influence of Volumetric Displacement and Aspect Ratio on the Performance Metrics of the Rotating Spool Compressor // International Compressor Engineering Conference. 2014. 2270. <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2270> (accessed: 26.04.2022). (In Engl.).

100. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Loss Analysis of Rotating Spool Compressor Based on High Speed Pressure Measurements // International Compressor Engineering Conference. 2014. 2271. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2271> (accessed: 20.03.2022). (In Engl.).

101. Orosz J., Bradshaw C. R., Kemp G. [et al.]. An update on the Performance and Operating Characteristics of a Novel Rotating Spool Compressor // International Compressor Engineering Conference. 2014. 2327. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2327> (accessed: 26.04.2022). (In Engl.).

102. Bradshaw C. R., Kemp G., Orosz J. [et al.]. Design Methodology Improvements of a Rotating Spool Compressor using a Comprehensive Model // International Compressor Engineering Conference. 2016. 2466. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2466> (accessed: 14.04.2022). (In Engl.).

103. Ro-Flo — Installation, Operation, and Maintenance Manual. URL: <https://roflocompressors.com> (accessed: 06.12.2022). (In Engl.).

104. Compressors — CVS Engineering. URL: <https://www.cvs-eng.de/en/public-transportation/compressors/> (accessed: 06.08.2022). (In Engl.).

105. Компрессор ротормо-пластинчатый KIT AERO RL [Rotary vane compressor KIT AERO RL]. URL: <https://www.snz.su/produktsiya/kompressora-i-vozdudhoduvki/vakuumnyekompressor/> (accessed: 06.08.2022). (In Russ.).

106. Ротормо-пластинчатый компрессор PAO NPO «Iskra» [Rotary vane compressor PJSC Research and Production Association «Iskra». URL: <https://www.tek-all.ru/> (accessed: 06.08.2022). (In Russ.).

107. Производство компрессорного и насосного оборудования [Manufacture of compressor and pumping equipment]. URL: <https://tehprom-k.ru/o-kompanii/> (accessed: 15.08.2022). (In Russ.).

108. Xu J., Yu B., Yang O. X. [et al.]. Research on motion and friction of rolling piston in rotary compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012047. (In Engl.).

109. Zhong H., Li X., Yang X. Study on leakage loss via the radial clearance in a double-swing vane compressor for electric vehicle air conditioning systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604, Issue 1. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012084. (In Engl.).

110. Li M., Ma Y., Tian H. A rolling piston-type two-phase expander in the transcritical CO₂ cycle // HVAC&R Research. 2011. Vol. 15 (4). P. 729–741. DOI: 10.1080/10789669.2009.10390860. (In Engl.).

111. Sakitani K., Moriwaki M., Okamoto M. Development of two-phase flow expander for CO₂ heat pump and air-conditioners // The 8th IEA Heat Pump Conference at Las Vegas. 2005. P. 1–8. URL: <https://iifir.org/en/fridoc/development-of-two-phase-flow-expander-for-co2-heat-pumps-and-air-22974> (accessed: 14.04.2022). (In Engl.).

112. Yang J., Zhang L., Yuan Li H. Development of a two-cylinder rolling piston CO₂ expander // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2010. Vol. 1411. P. 1–5. 2022. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2022/> (accessed: 14.04.2022). (In Engl.).

113. Hu J., Li M., Zhao Li. Improvement and experimental research of CO₂ two-rolling piston expander // Energy. 2015. Vol. 93. P. 2199–2207. DOI: 10.1016/j.energy.2015.10.097. (In Engl.).

114. Компрессоры для тепловых насосов [Heat pump compressors]. URL: <https://solarsoul.net/kompressory-dlya-teplovykh-nasosov> (accessed: 20.08.2022). (In Russ.).

115. Zelikovskiy I. Kh., Kaplan L. G. Malyye kholodil'nyye mashiny i ustanovki: sprav. [Small refrigeration machines and installations: handbook]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1989. 672 p. (In Russ.).

116. Leemhuis R. S., Soedel W. Kinematics of Wankel Compressors (or Engines) by Way of Vector Loops // International Compressor Engineering Conference. Purdue. 1976. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/228> (accessed: 20.08.2022). (In Engl.).

117. Mazda i rotornyy dvigatel' Vankelya [Mazda and the Wankel rotary engine]. URL: <https://naukatehnika.com/mazda-i-rotornyy-dvigatel-vankelya.html> (accessed: 08.08.2022). (In Engl.).

118. Beard J. E. Epitrochoidal Versus Hypotrochoidal Gerotor Type Pumps With Special Attention to Rubbing Velocities // International Compressor Engineering Conference. 1988. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/656> (accessed: 20.08.2022). (In Engl.).

119. Read M. Basic design procedure for an internally geared screw compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012055. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012055. (In Engl.).
120. Sukhomlinov R. M. Trokhoidnyye rotornyye kompressory [Trochoid rotary compressor]. Kharkiv: Vishcha shkola Publ., 1975. 151 p. (In Russ.).
121. Beniovich V., Apazidi G., Boyko A. Rotoporshnevyye dvigateli [Rotary piston engines]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1968. 151 p. (In Russ.).
122. Predpriyatiye po proizvodstvu trokhoidnykh kompressorov [Trochoid Compressor Manufacturing Enterprise]. URL: <https://www.invest-ngo44.ru/> (accessed: 08.08.2022). (In Russ.).
123. Heng K. R., Ooi K. T., Chan W. K. Experimental study of an oil-free swing vane compressor // International Journal of Refrigeration. 2022. Vol. 134. P. 95–104. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.028. (In Engl.).
124. Xia C., Zhang Z., Huang G. [et al.]. Study on the new hybrid thermodynamic cycle for an improved micro swing engine with heat recovery process // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 129. P. 1135–1149. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.123. (In Engl.).
125. Borisenko A. V. Razrabotka i issledovaniye rotornogo kholodil'nogo kompressora s sektornymi porshnyami [Development and research of rotary refrigeration compressor with sector pistons]. Moscow, 2020. 175 p. (In Russ.).
126. Yusha V. L. Sozdaniye i sovershenstvovaniye stupeney kompressorov ob'yemnogo deystviya dlya avtonomnykh mobil'nykh ustanovok [Creation and improvement of positive displacement compressor stages for autonomous mobile units]. Omsk, 2008. 434 p. (In Russ.).
127. Jungbluth G. Rotation's kolbenmaschinen nach Wankel und ander Bekannte Bauarten // Maschinenmarkt. 1975. Vol. 81, no. 35. P. 33–37. (In Engl.).
128. Cui B., Becker K., Lüdersen U. A study on the kinematics of a new Schukey-type rotary compressor // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012056. (In Engl.).
129. Mirovoy rynek kompressorov v 2022 godu [Global Compressor Market in 2022]. URL: <https://apic.ru/about/apic-news/5742/> (accessed: 20.08.2022). (In Russ.).
130. BITZER sozdayet tsentr kompetentsiy po rotornym kompressoram i sovmestnoye predpriyatiye s partnarami v Kitaye [BITZER establishes rotary compressor competence center and joint venture with partners in China]. URL: <https://www.holodinfo.ru/news/bitzer/> (accessed: 20.08.2022). (In Russ.).
131. Tekhnologicheskaya konkurentsia i natsional'naya bezopasnost'. Voyna tol'ko nachinayetsya [Technological competition and national security. The war has just begun]. URL: <https://ru.valdaiclub.com/a/highlights/voyna-tolko-nachinaetsya/> (accessed: 22.08.2022). (In Russ.).
132. Gorda A. S. Razvitiye global'noy konkurentsii stran v mirokhozaystvennoy sisteme [Development of global competition of countries in the landscape system] // Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Ekonomika i upravleniye. *Uchenyye Zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta Imeni V. I. Vernadskogo. Ekonomika i Upravleniye*. 2018. Vol. 4 (70), no. 4. P. 46–55. (In Russ.).
133. Dayneko A. E., Danil'chenko A. V., Glubokiy S. V. [et al.]. Mezhdunarodnaya konkurentosposobnost' real'nogo sektora ekonomiki Belarusi [International competitiveness of the real sector of the Belarusian economy] / ed. by A. E. Dayneko. Minsk, 2020. 228 p. (In Russ.).

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: 1978yusha@mail.ru

GROMOV Anton Yuryevich, Deputy General Director for Civilian Products of Scientific and Technical Complex «Cryogenic technique» JSC, Omsk.

Correspondence address: azot111@bk.ru

POTAPOV Yuriy Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of Development and New Technologies Department of Group of Companies «Titan» JSC, Omsk.

For citations

Yusha V. L., Gromov A. Yu., Potapov Yu. A. The analysis of promising directions for creation of domestic component base of volumetric rotary machines for low power energy, refrigeration and climate technology // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 4. P. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25.

Received September 13, 2022.

© V. L. Yusha, A. Yu. Gromov, Yu. A. Potapov