

УДК 621.56

Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 2. Технологии и наука

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН¹, А. В. КОВАНОВ², В. А. ЦВЕТКОВ¹

¹Университет ИТМО

²ООО «О'КЕЙ»

E-mail: wadimtsvetkov@mail.ru

Холодильное компрессоростроение — это значительная область в холодильной отрасли, обладающая высокой энергоемкостью и в то же время огромным потенциалом к энергоэффективным решениям. Общая тенденция в холодильной технике, основанная на Кигалийской поправке, ставит задачи совершенствования и создания новых образцов компрессорной техники. От возможности решения данных вопросов в глобальном смысле зависит и перспектива развития всей холодильной индустрии в дальнейшем. При этом, на фоне происходящих геополитических событий и корректив, которые вносит пандемия (Covid-19), особый интерес вызывает текущее состояние развития холодильного компрессоростроения. Рассмотрев ранее данный вопрос с общих позиций современного развития рынка, были отмечены особенности для каждой из объемных технологий компримирования и областей их применения. В настоящей статье для полноценного освещения темы, поставлена цель выяснить состояние науки и новых производственных решений, их соответствие запросам рынка, главным образом перспективность винтовых и спиральных компрессоров. Несомненно, следует отметить новые цифровые технологии, которые кардинально влияют, как на процессы в исследованиях, так и на производственные процессы, внося новую веху в проектирование и выпуск готовой продукции. Особое внимание уделено состоянию развития связей научно-исследовательских центров с производством, т. к. именно такое взаимодействие дает наилучший результат. В частности, с этих позиций в данной статье рассмотрены, как общемировые, так и отечественные тенденции развития холодильного компрессоростроения.

Ключевые слова: холодильный компрессор, развитие технологии компрессоров, компрессоростроение, холодильная промышленность, тенденции в холодильной индустрии.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 11.01.2023, одобрена после рецензирования 02.03.2023, принята к печати 10.03.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 2. Технологии и наука // Вестник Международной академии холода. 2023. № 2. С. 14–25
DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25

State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 2. Technology and science

D. Sc. V. A. PRONIN¹, A. V. KOVANOV², V. A. TSVETKOV¹

¹ITMO University

²LTD «OKAY»

E-mail: wadimtsvetkov@mail.ru

Refrigeration compressor industry is a significant area in the refrigeration industry with high energy consumption and, at the same time, enormous potential for energy-efficient solutions. The general trend in refrigeration engineering, based on the Kigali Amendment, poses the challenges of improving and creating new examples of compressor technology. The future prospects of the entire refrigeration industry also depend on the ability to address these issues in a global sense. At the same time, against the background of ongoing geopolitical events and corrections introduced by the pandemic (Covid-19), the current state of the refrigeration compressor industry is of special interest. Having considered this issue from the general point of view of modern market, the peculiarities for each of the volumetric compression technologies and their areas of application were identified. In the present article, for a full coverage of the subject, the aim is to clarify the state of the science and new production solutions, their compliance to market demands, first of all — the prospects of screw and scroll compressors. New digital technologies which radically affect both research and production processes and

bring a new milestone in design and production of finished products are sure to be mentioned. Particular attention is paid to the state of the relations between research centers and production, since it is this interaction that gives the best results. In particular, this article considers both worldwide and domestic trends in the development of refrigeration compressor industry from these positions.

Keywords: refrigerating compressor, advancements in compressor technology, compressor industry, refrigerating industry, trends in refrigerating industry.

Article info:

Received 11/01/2023, approved after reviewing 02/03/2023, accepted 10/03/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25

Article in Russian

For citation:

Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A. State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 2. Technology and science. Journal of International Academy of Refrigeration. 2023. No 2. p. 14–25. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25

Введение

Компрессоростроение является неотъемлемой составляющей холодильной отрасли, значение которой для мировой экономики играет важную роль. В предыдущей статье [1] было показано многообразие областей и сфер применения компрессоров объемного сжатия, значительная доля их мирового энергопотребления, таким образом в данной работе становится актуальным рассмотреть пути оптимизации энергозатрат. Также, ранее отмечалось о текущей задаче снижения применения ГФУ хладагентов в холодильной технике и постепенного перехода на озонобезопасные хладагенты. Оба эти тренда составляют общую тенденцию, которая развита в современных исследовательских работах и выражена в большинстве конструктивных улучшений при производстве компрессоров.

Последствия пандемии Covid-19, а также общемировые политические события продолжают вносить существенные коррективы в рынок холодильных компрессоров. Были отмечены процессы слияния и поглощения компаний на мировом рынке, в связи с этим интерес может вызывать современное распределение производственных площадок и производимой ими продукции. Особое внимание было уделено проблемам импортозамещения на российском рынке, такая ситуация сложилась из-за отсутствия полноценных линий производств на постсоветском пространстве, в секторе коммерческих компрессоров малой и средней производительности, что в свою очередь ставит актуальными вопросы восстановления специального технического образования и проведения отечественных исследовательских и конструкторских изысканий [1].

Востребованные запросы рынка, находят отклик в производственных наработках и различных исследовательских работах, итоги и перспективы которых обсуждаются на проходящих конференциях, где освещаются самые актуальные текущие вопросы науки и производства. Сам факт, а также качество и интенсивность проводимых конференций, в целом, указывает на текущее состояние отрасли.

Так, среди наиболее значимых мероприятий, прошедших в 2021–2022 гг., можно выделить следующие.

«Компрессорные технологии 2022». Конференция проводилась в Санкт-Петербурге с участием представителей ведущих вузов и производителей компрессорной техники. На данной конференции обсуждались, в основ-

ном, текущие отраслевые вопросы, среди которых: фактические эксплуатационные характеристики, опыт эксплуатации, обслуживания, диагностики и ремонта компрессоров и компрессорной техники; пэкиджирование и разработка технических заданий на компрессоры и компрессорное оборудование; вопросы проведения приемки компрессоров и компрессорного оборудования заказчиком и др.

XI Международная научно-техническая конференция молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин», организованная НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа (входит в Группу ГМС), совместно с Ассоциацией компрессорщиков и пневматиков (АСКОМП). На секции «Объемные компрессоры и установки» рассмотрены вопросы проектирования, расчетов, изготовления, эксплуатации, импортозамещения, технической диагностики и повышения ресурса компрессоров.

12-я Международная конференция «Компрессоры и их системы 2021» прошла в гибридном формате, с одной частью в Лондонском городском университете. В ходе трехдневной конференции, организованной Центром компрессорных технологий Лондонского городского университета, обсуждались новейшие разработки в области воздушных, газовых и холодильных компрессоров, вакуумных насосов и расширителей.

Конференция «Состояние и перспективы отечественного компрессоростроения» прошла в октябре 2022 г. Организатором конференции является Ассоциация компрессорных заводов. В ходе рассмотрения докладов были рассмотрены актуальные вопросы замещения импортного оборудования, вопросы производства запасных частей для иностранных компрессоров — обратный инжиниринг.

Конференция «Компрессоры-2021» (МИХ) 2021 г. проходила в Братиславе, Словакия. На конференции обсуждались компрессоры, технологии сжатия и охлаждения, вопросы проверки и диагностики компрессоров, а также хладагенты и холодильные масла.

Конференции Университета Пердью (штат Индиана, США): 25-я Международная конференция по проектированию компрессоров, 18-я Международная конференция по охлаждению и кондиционированию. На конференциях также актуальными стали вопросы совершенствования компрессорных технологий в холодильной отрасли.

не только сократить сроки вывода готовой продукции на рынок, но и снизить ее себестоимость, а также повысить качество.

В основе систем компьютерного проектирования и моделирования лежит использование научно обоснованных и экспериментально проверенных математических моделей. При использовании САПР удается в 2–3 раза сократить количество ошибок и нестыковок за счет смещения «центра тяжести» на этапе проектирования и моделирования в процессе разработки, а также дальнейшей эксплуатации компрессорных и холодильных установок. Таким образом, применение инструментов компьютерного инжиниринга, в частности CAE-систем, позволило успешно внедрить технологию «цифровых двойников», являющуюся основным элементом Индустрии 4.0 (Industry 4.0) в практику отечественного компрессоростроения [15]–[18]. Еще к одному из достижений цифровизации, применимому к области современного компрессоростроения, можно отнести применение технологии AR (Augmented Reality — дополненная реальность) при проектировании, производстве, эксплуатации и маркетинге компрессорного оборудования, которую широко применяет на всех этапах жизненного цикла своей продукции, в частности винтовых компрессоров производитель Howden (Германия) [16].

Внедрение ЭВМ, уже традиционно помогает решать сложные нелинейные уравнения n -го порядка, тем самым добиваться лучшего качества математической модели. Так, например, часто встречающаяся задача нестационарного течения рабочей среды в различных элементах компрессоров, требующая численного решения, может быть выполнена с помощью прикладных программ для ЭВМ. Данный тип программ принципиально отличаются от CAE-программ выполнением комплексного численного эксперимента в режиме экспресс-анализа [17], а также отсутствием необходимости создавать сложные CAD-модели, так как изначально в качестве объекта исследования принимается ступень компрессора. В настоящее время такой метод получил развитие в научном направлении «Математическое моделирование и САПР объемных компрессоров» [18]. Здесь важным моментом является необходимость создания универсальных программных многоуровневых комплексов, т. е. ряда прикладных программ, которые подчинялись бы какой-либо иерархии и могли использоваться для применения в различных типах компрессоров. Примерами таких программных пакетов для машин объемного типа действия являются: ПК, ScrewVB (СПбПУ) [19], КОМДЕТ-М (Университет ИТМО) [20] и др.

В Университете ИТМО разработана программа КОМДЕТ-М [21], предназначенная для [20]:

- самостоятельного анализа инженерно-техническим персоналом процессов, протекающих в ступенях машин объемного действия;

- прогнозирования интегральных и текущих параметров компрессорных и детандерных ступеней с заданными геометрическими и режимными параметрами и свойствами рабочего вещества;

- поиска и обоснования «оптимальных» технических решений на стадии проектирования новых или модернизации существующих машин.

Еще одним классом программных продуктов принято считать программы по подбору оборудования. Среди компаний OEM-производителей, инсталляторов оборудования, в проектных организациях широко используются программы, предназначенные для подбора оборудования [22]. Такие программы включает в себя практическое руководство и справочники, а также информацию по свойствам рабочего тела; выбор компрессора под требуемую производительность; расчет нагрузки; паспортные данные геометрии компрессора; расчет механизмов движения; сведения по спецификациям API и ISO; доступ к чертежам схемы оборудования и др. Широко распространены программы таких производителей, как Bitzer, Danfoss, Gea, Dorin, Eco и др. Исходными данными для работы в программах обычно являются: вид хладагента, температура кипения, холодопроизводительность, режим электропитания и прочее.

Касаемо темы подбора компрессорного оборудования актуальным вопросом является разработка новых методик подбора, основанных, например, на методах статистической обработки данных и машинного обучения (machine learning) [23].

Современное моделирование компрессорных систем, все чаще обращается к методу искусственных нейронных сетей (ИНС). Применение такого метода играет роль универсального аппроксиматора функции нескольких переменных, который реализует нелинейную функцию вида $y = F(x)$, где x — входной вектор (возможно, целый массив переменных), а y — реализованная функция нескольких переменных. Что безусловно является хорошим инструментом применительно к моделированию рабочих процессов компрессоров, однако следует принимать во внимание, необходимость создания большой базы данных, что возможно за счет большого объема теоретических и экспериментальных наработок [24].

Основные достижения Индустрии 4.0, развитие методов компьютерного инжиниринга, концепция «цифровых двойников» и пр., которые могут значительно сократить технологический разрыв между зарубежными и отечественными компаниями, при этом в процессе разработок полученные данные собираются и анализируются, а также рассчитываются ключевые показатели эффективности компрессора. Учитывая обозначенные тезисы, цифровое проектирование и моделирование являются ключевой технологией для быстрого создания глобально конкурентоспособной продукции нового поколения, в том числе в области создания компрессоров.

Исследовательские центры и межотраслевые связи

Среди ведущих мировых вузов, где в полной мере проводятся исследования, как рабочих процессов объемных компрессоров, так смежных вопросов относительно оптимальных конструкций и применяемых конструктивных материалов, можно назвать:

- Industrial Technology Research Institute;
- Genfu XIAO School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University;
- Purdue University;
- Federal University of Santa Catarina;

- Faculty of Engineering University of Ontario Institute of Technology (UOIT);
- City University School of Engineering and Mathematical Sciences Northampton Square London;
- Submitted to the Faculty of the University of Liège;
- Institut de Physique de Rennes;
- National Institute of Technology Rourkela.

Взаимодействие вузов, как исследовательских центров с производственными предприятиями, составляет отраслевую связь, которая важна не только в подготовке молодых специалистов, проходящих стажировки на предприятиях, но и при выполнении определённых исследовательских работ на базе университетов по запросу производства. При этом вопросе важную роль играют выделение грантов и проведение НИОКР. Примером, может являться отраслевая связь Institut de Physique de Rennes (Франция) и группы компаний Sanden (Япония) [25].

Отдельно следует сказать про российский сектор, здесь особое внимание необходимо уделить важнейшему звену развития и роста отечественной холодильной промышленности и компрессоростроения в ее составе. А именно, восстановлению полноценной системы подготовки специалистов-холодильщиков и компрессорщиков, данный вопрос целостно рассмотрен в работах [26, 27].

В Российской Федерации, в качестве подготовительных и исследовательских центров, можно отметить:

- Национальный исследовательский университет ИТМО;
- Омский государственный технический университет;
- Московский государственный технический университет им. Баумана;
- Казанский национальный исследовательский технологический университет;
- Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого.

Здесь еще сохраняется «старая» школа, есть приток молодых специалистов. Ситуация осложняется деиндустриализацией и сокращением выпуска отечественного компрессорного, холодильного и климатического оборудования. На фоне социально-экономических преобразований отечественный рынок перенасытился импортной техникой, и, как следствие уменьшилась потребность в профильных специалистах-разработчиках, проектировщиках, отсутствуют созидательные изменения в учебном процессе. Для сохранения должного уровня подготовки специалистов, необходимо способствовать развитию научно-технического потенциала профильных институтов и предприятий, выявлять и продвигать инновационные, прорывные разработки в области генерации холода и совершенствования компрессорных технологий. Структура советских НИИ практически разрушена. Стоит обратить внимание, что большинство основных исследований и разработок в мире производится связками «производственная компания — вуз», в которых объединяется практический опыт производственных компаний и теоретические изыскания научных коллективов при вузах. Необходимо воссоздать подобные научно-производственные связи для эффективного решения проблем отечественной холодильной промышленности. Что в настоящее время, возможно, под кураторством опытных специалистов из числа профес-

сорско-преподавательского состава — носителей предметных компетенций.

Частные тенденции и направления развития объемных технологий

Разумно предположить, что пути исследования в хорошо изученной традиционной поршневой технологии могут проходить в отношении сокращения потерь на трение динамически сопряженных деталей, путем поиска новых конструкционных материалов. Так же актуальной задачей может являться сокращение мертвого объема за счет внедрения инновационных конструкций клапанных узлов, как например запатентованная технология Discus от компании Emerson.

Прогрессивными направлениями в совершенствовании ротационно-пластинчатых компрессоров являются создание моноблочных конструкций, переход от смазываемых компрессоров к маслозаполненным, расширение использования номенклатуры машин без смазки, расширение использования номенклатуры машин с воздушным охлаждением, увеличение ресурса работы без замены каких-либо деталей до 50–100 тыс. ч. Но основное внимание для исследований представляют винтовая и спиральная технологии.

1. Винтовые компрессоры (ВКМ)

Габариты винтовых компрессоров ограничены возможной деформацией роторов, максимально допустимой нагрузкой на подшипники и предельной скоростью вращения. Однако нет существенных ограничений, касающихся разности давлений, это заметно расширяет рабочий диапазон ВКМ и, соответственно, обуславливает дальнейшую перспективу их применения. Эти машины используются в водо- и воздушноохлаждаемых чиллерах, тепловых насосах, холодильных установках и промышленном оборудовании для сжижения газа.

Основным фактором, влияющим на эффективность винтовых компрессоров, являются протечки рабочей среды из-за наличия технологических зазоров между рабочими органами ВКМ. Многие современные разработки пользуются инструментами компьютерного моделирования для усовершенствования технологий производства форм зубьев винтов и их оптимизации.

В результате, общую эффективность винтовых компрессоров удалось повысить до уровня, соответствующего или даже превышающего эффективность малых и средних компрессоров центробежного типа. Одновременно с этим внедрение систем регулирования, использующих переменное объемное отношение (VVR), позволило повысить эффективность работы винтовых компрессоров на переменных режимах работы.

Ведущие поставщики компрессоров расширяют линейки устройств винтового типа, рассчитанных на работу с природными хладагентами. Альтернативные хладагенты с низким ПГП для винтовых компрессоров большой мощности (по состоянию на 2022 г.) представлены в табл. 2.

Показатели производительности определены путем сравнения результатов, полученных из программного обеспечения Bitzer, для компрессоров одинаковой объемной производительности при одной и той же степени повышения давления.

Таблица 2

Альтернативные хладагенты с низким ПГП

Table 2

Alternative refrigerants with low GWP

Давление	Существующий хладагент		Альтернатива				
	Код ASHRAE	ПГП	Код ASHRAE	ПГП	Класс опасности	Производительность	Эффективность
Среднее	R134a	1430	R123ze (E)	<1	A2L	Базовый уровень: R134a (=100 %)	
						74%	100%
	R404A	3780	R513A	573	A1	100%	98%
			R515B	293	A1	75%	100%
Высокое	R410A	1980	R717	0	B2	100%	85%
			R744	1	A1	215%	100%

Широкое распространение в Европе получил умеренно горючий (A2L) хладагент R1234ze (E), представляющий собой перспективную альтернативу хладагенту среднего давления R134a для использования в чиллерах водяного и воздушного охлаждения на базе винтовых компрессоров. R513A чаще применяют там, где законодательство очень жестко ограничивает использование горючих хладагентов. Недавно был выпущен хладагент R515B, которому присвоен класс A1 (негорючий). Новинка, ПГП которой меньше, чем у R513A, предлагается в качестве замены R134a и представляет собой азеотропную смесь R1234ze (E) и R227ea. Даже с учетом вышесказанного следует признать, что эффективные альтернативы для R134a, которые бы сочетали ультранизкий ПГП с негорючестью, пока недоступны. Аммиак используется в качестве хладагента для промышленного холодильного оборудования на протяжении многих лет. Этот хладагент отличается высокой эффективностью цикла и низкой стоимостью, но при этом токсичен и способен вступать в реакцию с медью. Компании Kobelco и Mauekawa разработали и выпустили на рынок полугерметичные одно- и двухступенчатые винтовые компрессоры для аммиака. Для предотвращения коррозии обмотки электродвигателей этих компрессоров выполнены из алюминия. Svenska Rotor Maskiner (SRM), входящая в Snowman Group, также представила линейку полугерметичных одно- и двухступенчатых винтовых компрессоров для аммиака с алюминиевыми обмотками электродвигателей. GEA разработала полугерметичные винтовые компрессоры на аммиаке для использования в составе систем кондиционирования воздуха.

На сегодняшний день CO₂ признан надежным и экологически безопасным хладагентом для систем охлаждения супермаркетов и промышленного холодильного оборудования. GEA поставляет компрессоры для CO₂ с приводом открытого типа, рассчитанные на давление в 6,3 МПа. В их конструкции использованы роторы высокой прочности с комбинацией числа зубьев 6/8.

Пропан (R290) — высокоэффективный хладагент с низким ПГП, имеющий класс пожароопасности A3 (горючий). Он применяется не только в бытовых кондиционерах, но и в холодильных установках и чиллерах. Компании Bitzer и Frascold выпускают полугерметичные винтовые компрессоры мощностью от 40 до 390 л. с. (30–286 кВт), специально разработанные для использования с R290.

Усилия многих инженеров сконцентрированы на оптимизации профилей роторов винтовых компрессоров. Кроме того, ведутся работы по поиску оптимальной компоновки элементов конструкции однороторного типа. Результаты исследования нового типа однороторных винтовых компрессоров с тремя канавками на главном роторе и десятизубцовыми ведомыми звездочками опубликовали A. Dhunrut с соавторами в 2019 г. Как сообщается, новая конфигурация повышает интегральный показатель эффективности при неполной нагрузке (IPLV) на 7 % по сравнению с традиционной компоновкой.

Считается, что хладагенты низкого давления не подходят для компрессоров объемного сжатия винтового типа. Однако в 2018 г. была опубликована работа M. Akei, описывающая конструкцию, включающую винтовой мини-компрессор для хладагента низкого давления. По габаритам и мощности этот компрессор, приводимый в движение высокоскоростным электродвигателем на постоянных магнитах, сравним с существующими спиральными компрессорами на R410A.

Системы, использующие органический цикл Ренкина для преобразования бросового тепла в электроэнергию, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Эти установки, также называемые бинарными генераторами, так как они одновременно производят тепло и электричество, используют в качестве рабочего тела хладагенты низкого давления, такие как R245fa, R1233zd (E) и R1224yd (Z).

В подобных системах применяют детандеры центробежного и винтового типов. Kobelco разработала микросистему бинарной генерации на базе полугерметичного винтового детандера, способную производить до 72 кВт электроэнергии и подавать горячую воду. В качестве источника тепла используется отводящая бросовое тепло вода, нагретая до 70–95 °С. Указанная технологическая схема представлена на рис. 1.

В настоящее время интерес вызывает одновинтовая конструкция детандера. Исследование, посвященное оценке показателей эффективности одновинтового детандера для органического цикла Ренкина с R1233zd (E) в качестве рабочего тела, опубликовано в 2016–2017 гг. D. Ziviani с соавторами [28, 29].

В отечественной практике в сегменте винтовых однороторных компрессоров, на сегодняшний день, ведется разработка винтового однороторного компрессора с окружной формой зуба отсекающего. Сотрудниками Уни-

верситета ИТМО, совместно с сотрудниками АО НПО «Компрессор», получен патент на данную конструкцию [30]. Среди направлений дальнейшего совершенствования данного типа винтовых однороторных компрессоров, можно выделить повышение энергоэффективности его работы, а также продление срока службы. Одним из способов повышения энергоэффективности винтовых компрессоров является создание экономичных способов регулирования их производительности, так для ВКО был запатентован внутренний регулятор производительности в виде поворотного регулировочного кольца [31], а также разработана математическая модель процесса регулирования [32]. Одним из способов повышения срока эксплуатации является уменьшение трения рабочих органов, так был предложен и запатентован вариант конструкции ВКО с улучшенными условиями смазки [33].

2. Спиральные компрессоры

Для СПК приоритетным направлением являются технологии, также связанные с переводом их на новые озонобезопасные хладагенты с низким ПГП.

В 2001 г. компания Denso разработала спиральный компрессор для CO_2 с герметичным корпусом низкого давления и нижним расположением механизма, и выпустила в продажу водонагреватели Eco Cute на его основе. После этого многие японские производители создали свои компрессоры для CO_2 и вышли на рынок тепловых насосов для нагрева воды. Hitachi и Panasonic разработали компрессоры спирального типа в герметичном корпусе высокого давления, Mitsubishi Electric и Daikin представили ротационный компрессор также в герметичном корпусе высокого давления, а Sanyo создала двухступенчатый ротационный компрессор в герметичном корпусе промежуточного давления.

По сравнению с традиционными компрессорами систем кондиционирования воздуха и холодоснабжения, компрессор для CO_2 отличается крайне высоким рабочим давлением и малым рабочим объемом. Чтобы обеспечить герметичность и устойчивость к высокому давлению предпринимались попытки увеличить прочность подвижной и неподвижной спиралей и повысить надежность подшипников. С этой целью фирма Mitsubishi Electric исследовала параметры подшипников скольжения подвижной спирали, Panasonic изучала деформацию механизма в результате воздействия давления и температуры. Эта задача является весьма непростой, если учесть значительные перепады рабочих давлений, действующие на спираль, и ограниченные объемы размещения элементов механизма движения компрессора [34, 35].

Кроме того, было проведено множество исследований возможности применения спиральных детандеров и детандер-компрессоров для рекуперации энергии в процессе расширения в сверхкритическом цикле охлаждения. Компания Hitachi разработала прототип CO_2 -расширителя (детандера) и детандер-компрессорного агрегата с расширителем с одной стороны и осевым компрессором с другой стороны, построив на их основе чиллер для демонстрации эффективности такого решения.

Аналогичный прототип был создан и в Mitsubishi Electric. По итогам его испытаний выяснилась важность

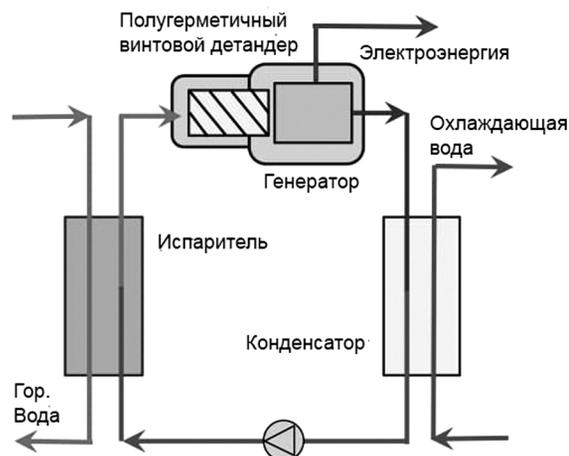


Рис. 1. Органический цикл Ренкина с винтовым компрессором

Fig. 1. Rankine organic cycle with screw compressor

снижения потерь давления в каждом элементе конструкции, а также предотвращения утечки тепла из осевого компрессора в расширитель для эффективности рекуперации и использования энергии расширения.

Фирма Panasonic сообщает о моделировании детандер-компрессора, объединяющего двухступенчатый ротационный детандер и спиральный компрессор. Изучение теплового насоса для нагрева воды, оборудованного таким детандер-компрессором и обычным компрессором, показало возможность повышения коэффициента производительности (COP) на величину до 15 % за счет рекуперации энергии в ходе расширения и улучшения алгоритмов управления.

Исследования также показали возможность повысить эффективность компрессоров для CO_2 за счет применения двухступенчатого сжатия. В 2011 г. компания Mitsubishi Heavy Industries (MHI), создала двухступенчатый компрессор для CO_2 , используя механизм ротационного типа для ступени низкого давления и спиральный механизм для ступени высокого давления. Данный компрессор был установлен в тепловой насос для нагрева воды коммерческого назначения. В последствии подобные двухступенчатые компрессоры нашли применение в конденсаторных блоках для средне- и низкотемпературного оборудования. Пример спирального компрессора на CO_2 представлена на рис. 2.

В 2017 г. компания Sanden впервые выпустила на рынок компрессоры на CO_2 , предназначенные для автомобильных кондиционеров, а в 2021 г. подразделение Copeland компании Emerson презентовала совершенно новую разработку СПК для диоксида углерода с технологией Dynamic Vapour Injection (DVI), работающего в транскритической области [36]. Такое решение показало на 4 % большую эффективность в холодном климате, на 6 % в умеренном климате и на 8 % в теплом климате. Стоимость бустерной системы по данным снизилась на 9 %. Уменьшилась стоимость эксплуатации, а более простые настройки системы позволяют экономить до 14 % средств. Еще одним преимуществом спиральной конструкции является малая металлоёмкость, практически на 50 % ниже, чем у поршневых компрессоров, а снижение веса всей системы может достигать до 10 %. Про-



Рис. 2. Двухступенчатый спиральный компрессор на CO_2
 Fig. 2. Two-stage scroll compressor with CO_2 as a refrigerant

ектные данные были подтверждены в рамках пилотного проекта на базе магазина в Малмсбери, Великобритания.

В Японии в результате распространения хладагента R32 в качестве рабочего тела для бытовых и полупромышленных кондиционеров, были разработаны компрессоры, наилучшим образом подходящие для работы с ним. Компания Daikin создала компрессор, отличающийся повышенной эффективностью и надежностью благодаря периодической смазке соприкасающихся частей спиралей и применению специальных масел, хорошо растворяющихся в R32 при низкой температуре. Для мульти-сплит-систем Mitsubishi Electric разработала компрессор с системой впрыска, препятствующей повышению температуры газа на линии нагнетания за счет подачи жидкого хладагента непосредственно в камеру всасывания до начала процесса сжатия. По сообщению компании, это решение предотвращает утечку холодильного масла, которое остается в герметично закрытом корпусе компрессора, а также сокращает потери из-за неэффективного сжатия.

В сегменте низкотемпературного оборудования также идет переход на хладагенты с пониженным ПГП. Для компрессорно-конденсаторных блоков компания Hitachi разработала инверторный компрессор повышенной эффективности с асимметричной формой спирали и улучшенным портом нагнетания. Mitsubishi Electric предлагает компрессор, который может использовать как R410A, так и R463A, что позволяет организовать плавный переход на новый хладагент.

Компания Emerson разработала спиральный компрессор с инверторным приводом, предназначенный для использования углеводородного хладагента R290. Конструкция, использующая корпус с низким давлением внутри, позволяет снизить объем заправки хладагента за счет меньшей растворимости R290 в холодильном масле и уменьшения количества газообразного хладагента внутри корпуса компрессора (рис. 3).

Фирма Mauekawa разработала компрессор на R290 с инжекторным охлаждением для коммерческих высокотемпературных тепловых насосов. Данный компрессор имеет взрывозащищенную конструкцию, отличающуюся повышенной эффективностью и надежностью.

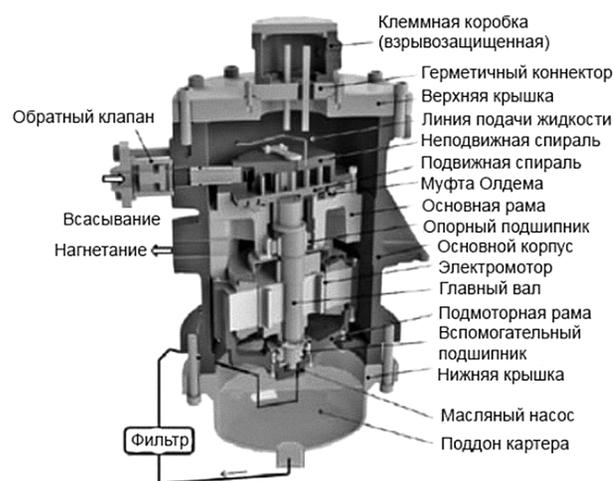


Рис. 3. Углеводородный спиральный компрессор
 Fig. 3. Hydrocarbon scroll compressor

В то же время исследуется возможность применения аммиака в качестве хладагента, в частности, путем моделирования определяется оптимальная конфигурация обмотки из алюминиевой проволоки.

Практика показывает, что спиральная конструкция подходит для различных видов и областей применения: наддува, жидкостных насосов, двигателей, детандеров на основе органического цикла Ренкина, компрессоров топливных ячеек. Ожидается, что в будущем сфера ее использования расширится еще больше.

Исследования спиральной технологии в Российской Федерации ведутся в университетах Москвы, Казани, Санкт-Петербурга. В первых двух университетах исследование ведется в основном в областях вакуумной техники, детандеров и компрессоров сухого сжатия. При этом, во Всесоюзном научно-исследовательском проектно-конструкторском и технологическом институте холодильного машиностроения (ВНИИхолодмаш), был изготовлен образец спирального компрессора СК-16 для морской холодильной машины МХМ25. В Казани воздушные спиральные компрессоры разрабатывали также и в «НИИ турбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» — стратегическом партнере Казанского завода компрессорного машиностроения (ОАО «Казанькомпрессормаш») [37].

В Санкт-Петербурге, начиная с 80-х, исследования холодильного СПК проводились в Ленинградском институте холодильной промышленности. Затем его название менялось: Санкт-Петербургская государственная академия холода и пищевых технологий, Государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, а ныне — Образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО. Здесь исследования главным образом ведутся в направлении оптимизации характеристик холодильного СПК с регулируемой производительностью, исследования проводят с целью повышения коэффициента подачи и интенсификации теплообменных процессов при компримировании, что позволяет увеличить диапазон рабочих характеристик компрессора, а также снизить энергетические затраты на привод.

Выводы и рассуждения

В итоге, соблюдая тренд противодействия глобальному потеплению индустрия климата и искусственного холода снижает энергопотребление оборудования, повышая его эффективность, и переходит на хладагенты с более низким ПГП.

На сегодняшний день наибольшее внимание привлекают умеренно горючие хладагенты R32, R447A, R454A и негорючий хладагент R466A в качестве замены R410A в кондиционерах воздуха, а также R448A, R449A и R463A как альтернатива R404A для использования в холодильной и морозильной технике. Такое положение дел, требует адаптации уже апробированных моделей и создания новых образцов, в целях чего следует решить ряд следующих актуальных задач.

1. Совершенствование внутренних процессов в компрессорах как основы для повышения их рабочих характеристик, улучшения технологии изготовления и повышения эксплуатационной надежности компрессоров. Модернизация и создание новых конструкций машин.

2. Расширение выпуска компрессоров с утилизацией тепла сжатия.

3. Оснащение компрессорного оборудования средствами технической диагностики и микропроцессорной техники.

4. Важнейшим направлением остается повышение КПД компрессоров, особенно при работе на нерасчетных режимах. Необходимость эффективных методов регулирования производительности.

В мировых масштабах после окончания мероприятий, связанных с поглощением, миграцией и слиянием предприятий на рынок выйдут новые универсальные производители, готовые предложить конечному покупателю полностью готовый продукт инсталляция которого будет заключаться преимущественно в простой установке и подключении к энергетическим источникам и инженерным коммуникациям. Отечественное компрессоростроение, видимо, должно пройти весь путь и интенсифицировать производство начиная не с повторения, а с совершенствования конструкций, технологии изготовления, а также форм и методов серийного производства, при этом самая современная конструкция зачастую не может быть внедрена в производство, если она не является технологичной.

Одна из главных задач отрасли — осуществление комплекса мероприятий по управлению технологичностью и совершенствование условий производства компрессоров. Это позволит в свою очередь:

1. Осуществить целенаправленную отработку новых конструкций машин на всех этапах проектирования и тем самым повысить технико-экономические показатели, а также уменьшить объем работ при проектировании.

2. Обеспечить широкое внедрение прогрессивных технологических процессов и снизить трудоемкость, металлоемкость, энергоемкость.

3. Повысить при проектировании точность технико-экономических показателей и расчетов на прочность и надежность.

4. Шире использовать положительный опыт заводов отрасли в проектировании и производстве.

5. Обеспечить единство технологического подхода.

6. Автоматизировать управление технологичностью.

Конечно, следует отметить необходимость межотраслевого сотрудничества и возобновления полного объема профильного образования, повышения его качества с учётом современных запросов рынка.

В современных реалиях преобразований социально-экономических систем и тенденции к импортозамещению, развитие отечественного холодильного компрессоростроения является актуальной задачей. Для ее решения необходима как консолидация сотрудничества между производственными организациями и учебными заведениями, так и восстановление и популяризация инженерного образования в области холодильной и компрессорной техники. В аспекте учебной подготовки обучающихся по направлению «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» (и смежных с ним) необходимо решить ряд важных вопросов, таких как:

— адаптация учебного процесса в соответствии с принятой структурой обучения (бакалавриат — магистратура — аспирантура) без потери полноты и качества профессиональной подготовки. Принять во внимание успешный многолетний опыт подготовки обучающихся на уровне специалитета;

— актуализация учебных планов, рабочих программ профильных дисциплин, информационных и учебно-методических ресурсов в соответствии с современными мировыми тенденциями развития отрасли и запросами индустрии;

— восстановление и развитие лабораторной базы;

— подготовка научно-педагогических кадров.

Таким образом, будет обеспечено высокое качество профильного образования, престиж профессии и развитие отрасли.

Литература

1. Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 1. Рынок и производство. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22
2. Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 года: «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». [Электронный ресурс]: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_ru.pdf. Дата обращения: 20.10.2022.

References

1. Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A. State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 1. Market and production. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 1. p. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22
2. Resolution adopted by the United Nations General Assembly on 25 September 2015: «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development». [Electronic resource]: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_ru.pdf. Date of access: 20.10.2022. (in Russian)

3. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
4. Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации».
5. Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 (ред. от 15.03.2021) «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
6. Пронин В. А., Кованов А. В., Калашникова Е. А., Цветков В. А. Перспектива использования озонобезопасных хладагентов с низким потенциалом глобального потепления в спиральных компрессорах. Часть 1. // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5. № 4. С. 9–16.
7. Пронин В. А., Кованов А. В., Калашникова Е. А., Цветков В. А. Перспектива использования озонобезопасных хладагентов с низким потенциалом глобального потепления в спиральных компрессорах. Исследования и практика применения R744 и R290. Часть 2. // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6. № 1. С. 14–21.
8. Пронин В. А., Цветков В. А., Кованов А. В., Михайлова Е. Н. Математическая модель процесса регулирования производительности винтового однороторного компрессора регулятором производительности в виде поворотного регулирующего кольца // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20
9. Salman A. S., Kochenkov N. V., Sulin A. B., Arendateleva S. I., Lysev V. I. Methodology for considering climatic information during the analysis of the air conditioning systems energy efficiency // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2486. No. 1. pp. 020 017.
10. Камара С., Сулин А. Б., Лысев В. И. Аналитическое исследование производительности коллектора комбинированного типа для солнечного нагрева и ночного радиационного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1 (82). С. 26–36.
11. Sulin A. B., Muraveinikov S. S., Sankina Y., Ryabova T. V., Devyatova O. Algorithm for preventive regulation of the ventilation system // AIP Conference Proceedings, 2021, Vol. 2412, pp. 030 028
12. Evangelos B., Christos T. Incorporation of an organic Rankine cycle in a transcritical booster CO₂ refrigeration system // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44. No. 10. pp. 7974–7988.
13. Zheng S., Wei M., Hu C., Song P., Tian R. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂ // Science China Technological Sciences. 2021. Vol. 64. No. 5. pp. 971–983.
14. Zheng S., Wei M., Song P., Hu C., Tian R. Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of trans-critical CO₂ in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 175. pp. 115 368.
15. Блинов В. Л., Богданец С. В. Цифровые двойники турбомашин: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. 162 с.
16. Кожухов Ю. В., Карташов С. В., Аксенов А. А. Цифровые двойники объектов компрессорных станций, установок подготовки газа и турбодетандеров // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2019). 2019. С. 58–58.
3. Federal Law of 23.11.2009 No. 261-FZ (as amended on 11.06.2021) On Energy Saving and Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation. (in Russian)
4. Decree of the President of the Russian Federation of 13.05.2019 No. 216 «On Approval of the Energy Security Doctrine of the Russian Federation». (in Russian)
5. Presidential Decree No. 642 of 01.12.2016 (revised on 15.03.2021) «On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation». (in Russian)
6. Pronin V. A., Kovanov A. V., Kalashnikova E. A., Tsvetkov V. A. The prospect of using ozone-safe refrigerants with low global warming potential in scroll compressors. Part 1. *Omsk Scientific Bulletin. A series of aviation-rocket and power engineering*. 2021. vol. 5. no 4. p. 9–16. (in Russian)
7. Pronin V. A., Kovanov A. V., Kalashnikova E. A., Tsvetkov V. A. The prospect of using ozone-safe refrigerants with low global warming potential in scroll compressors. Research and practice of the use of R744 and R290. Part 2. *Omsk Scientific Bulletin. A series of aviation-rocket and power engineering*. 2022. vol. 6. no 1. p. 14–21. (in Russian)
8. Pronin V. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Mikhailova E. N. Mathematical model for capacity regulation of screw single-rotor compressor by capacity control in the form of rotary adjustment ring. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 2. p. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-13-20. (in Russian)
9. Salman A. S., Kochenkov N. V., Sulin A. B., Arendateleva S. I., Lysev V. I. Methodology for considering climatic information during the analysis of the air conditioning systems energy efficiency. *AIP Conference Proceedings*, 2022. Vol. 2486. No. 1. pp. 020 017.
10. Camara S., Sulin A. B., Lysev V. I. Analyzing the performance of a combined type collector for solar heating and night radiation cooling. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 1. p. 26–36. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-26-36 (in Russian)
11. Sulin A. B., Muraveinikov S. S., Sankina Y., Ryabova T. V., Devyatova O. Algorithm for preventive regulation of the ventilation system. *AIP Conference Proceedings*, 2021. Vol. 2412. pp. 030 028
12. Evangelos B., Christos T. Incorporation of an organic Rankine cycle in a transcritical booster CO₂ refrigeration system. *International Journal of Energy Research*, 2020. Vol. 44. No. 10. pp. 7974–7988.
13. Zheng S., Wei M., Hu C., Song P., Tian R. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂. *Science China Technological Sciences*. 2021. Vol. 64. No. 5. pp. 971–983.
14. Zheng S., Wei M., Song P., Hu C., Tian R. Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of trans-critical CO₂ in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 2020. Vol. 175. pp. 115 368.
15. Blinov V. L., Bogdanec S. V. Digital twin turbomachines: a textbook. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2022. 162 p. (in Russian)
16. Kozhuhov Yu. V., Kartashov S. V., Aksenov A. A. Digital doubles of compressor stations, gas treatment plants and turbo expanders. *Gas transmission systems: present and future (GTS-2019)*. 2019. p. 58–58. (in Russian)
17. Ivanov V. M., Kozhuhov Yu. V. Improving the design quality of low-flow stages of centrifugal compressors by creating a database

17. Иванов В. М., Кожухов Ю. В. Повышение качества проектирования малорасходных ступеней центробежных компрессоров путем создания базы данных виртуальных рабочих колес по результатам CFD-моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19. № 1. С. 83–93.
18. Цветков В. А., Жигновская Д. В. Предпосылки и основные положения разработки модели «цифрового двойника» ВКО в концепции системы «Фабрик будущего» // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. 2021. [Электронный ресурс]: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/6147>.
19. Научно-инжиниринговая группа «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа». [Электронный ресурс]: <https://kviht.ru/наши-программные-продукты/> Дата обращения: 02.11.2022.
20. Прилуцкий И. К., Прилуцкий А. И., Маковеева А. С., Молодов М. А. Алгоритм создания в программе КОМДЕТ-М рабочих веществ произвольного состава: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2018. 79 с.
21. Маковеева А. С. и др. Практическое использование программы КОМДЕТ-М для оптимизации конструкции поршневых компрессоров. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 3. С. 50–60.
22. Рекомендации АО «Холодмаш» по выбору компрессоров // Холодильная техника. 2002. Т. 91. № 6. С. 9–10.
23. Tsvetkov V. A., Pronin V. A., Arendateleva S. I., Kovanov A. V., Ryabova T. V. Approach to the selection of ship compressor equipment using statistical data processing methods // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2486. pp. 020 020
24. Singh S., Dasgupta M. S. Performance evaluation of a CO₂ scroll expander for work recovery using artificial neural network // Science and Technology for the Built Environment. 2018. Vol. 24. No. 6. pp. 580–587.
25. Buisson M. Un lien Industrie-Université via les stages estudiantins // CFM 2017–23ème Congrès Français de Mécanique. — AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2017.
26. Баранов И. В., Пивинский А. А., Дубровин С. А., Тутова М. С., Сорокин С. А. Анализ лучших мировых практик подготовки кадров в сфере холодильной техники и кондиционирования и возможности их применения на территории Ленинградской области // Холодильная техника. 2020. № 4. С. 32–35.
27. Цыганков А. В., Гримитлин А. М. Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 47–50.
28. Ziviani D., Dickes R., Quoilin S., Lemort V., Paepe M. D., Broek M. V. Organic Rankine cycle modelling and the ORCmKit library: analysis of R1234ze (Z) as drop-in replacement of R245fa for low-grade waste heat recovery // The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. 2016. pp. 1–13.
29. Ziviani D., Gusev S., Schuessler S., Abdennacer A., Braun J., Groll E., Paepe M., Martijn B. Employing a Single-Screw Expander in an Organic Rankine Cycle with Liquid Flooded Expansion and Internal Regeneration. // The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. 2016. pp. 1–13.
30. Винтовой однороторный маслозаполненный компрессор. Патент РФ 199 030: МПК7 F 04 C 18/16 / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Божедомов А. В., Котлов Н. А.; заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», заявл. 2 020 114 579; опубл. 07.08.2020, Бюл. № 22.
- of virtual impellers based on the results of CFD modeling. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov*. 2021. vol. 19. No 1. p. 83–93. (in Russian)
18. Tsvetkov V. A., Zhignovskaya D. V. Prerequisites and main provisions of the development of the «digital twin» model of East Kazakhstan region in the concept of the «Factories of the future» system. *Collection of abstracts of the Congress of Young Scientists*. 2021. [Electronic resource]: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/6147>, svob. (in Russian)
19. Scientific-engineering group Compressor, vacuum, refrigeration equipment and gas transport and processing systems [Electronic resource]: <https://kviht.ru/наши-программные-продукты/> Date of reference: 02.11.2022 (in Russian)
20. Prilutsky I. K., Prilutsky A. I., Makoveeva A. S., Molodov M. A. Algorithm for creating working substances of arbitrary composition in the COMET-M program: textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2018. 79 p. (in Russian)
21. Makoveeva A. S. et al. Practical use of the KOMDET-M program to optimize the design of reciprocating compressors. *Scientific Journal of NIU ITMO. Series «Refrigeration and air conditioning»*. 2014. No. 3. pp. 50–60. (in Russian)
22. Recommendations of JSC «Kholodmash» on the choice of compressors. *Refrigeration equipment*. 2002. Vol. 91. No. 6. p. 9–10. (in Russian)
23. Tsvetkov V. A., Pronin V. A., Arendateleva S. I., Kovanov A. V., Ryabova T. V. Approach to the selection of ship compressor equipment using statistical data processing methods. *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2486. pp. 020 020.
24. Singh S., Dasgupta M. S. Performance evaluation of a CO₂ scroll expander for work recovery using artificial neural network. *Science and Technology for the Built Environment*. 2018. Vol. 24. No. 6. pp. 580–587.
25. Buisson M. Un lien Industrie-Université via les stages estudiantins. CFM 2017–23ème Congrès Français de Mécanique. — AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2017.
26. Baranov I. V., Pivinsky A. A., Dubrovin S. A., Tutova M. S., Sorokin S. A. Analysis of the best world practices of personnel training in the field of refrigeration and air conditioning and the possibility of their application on the territory of the Leningrad region. *Refrigeration equipment*. 2020. No. 4. pp. 32–35. (in Russian)
27. Tsygankov A. V., Gritimlin A. M. The state and prospects of development of air conditioning systems *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2013. No. 4. pp. 47–50. (in Russian)
28. Ziviani D., Dickes R., Quoilin S., Lemort V., Paepe M. D., Broek M. V. Organic Rankine cycle modelling and the ORCmKit library: analysis of R1234ze (Z) as drop-in replacement of R245fa for low-grade waste heat recovery. *The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. 2016. pp. 1–13.
29. Ziviani D., Gusev S., Schuessler S., Abdennacer A., Braun J., Groll E., Paepe M., Martijn B. Employing a Single-Screw Expander in an Organic Rankine Cycle with Liquid Flooded Expansion and Internal Regeneration // The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. 2016. pp. 1–13.
30. Screw single-rotor oil-filled compressor. Patent of the Russian Federation 199 030: МПК7 F 04 C 18/16 / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Y. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Bozhedomov A. V., Kotlov N. A.; applicant and patent holder of JSC «Compressor», application 2 020 114 579; publ. 07.08.2020, Bul. No. 22. (in Russian)

31. Однороторный винтовой компрессор. Патент РФ 212 922: МПК7 F 04 C 18/52 / Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Пронин В. А., Бураков А. В., Божедомов А. В., Цветков В. А. заявитель и патентообладатель АО «Компрессор», — заявл. 2 022 116 811; опубл. 21.06.2022, Бюл. № 23.
32. Прилуцкий И. К., Молодова Ю. И., Татаренко Ю. В. Сравнительный анализ методов расчета процесса теплообмена в ступенях компрессоров объемного принципа действия // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20
33. Однороторный винтовой маслозаполненный компрессор. Патент РФ 212 931: МПК7 F 04 C 18/52 / Пронин В. А., Цветков В. А. заявитель и патентообладатель Университет ИТМО, заявл. 2 022 118 019; опубл. 01.07.2022, Бюл. № 23.
34. Кованов А. В. Обзор рынка спиральных компрессоров, некоторые аспекты развития технологии // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2020. Т. 1. С. 113–119.
35. Kenji Y., Hideto N., Mihoko S. Development of Large Capacity CO₂ Scroll Compressor // International Compressor Engineering Conference. 2008, pp. 1189
36. Emerson. The new cool. CO₂ scroll technology for booster systems: Our solution to your challenges [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.coolingpost.com/products/emerson-boost-for-co2-scroll-technology/> Дата обращения: 10.11.2022.
37. Ибрагимов Е. Р. Разработка основных параметров построения ряда спиральных компрессоров: отчет о НИР (промежуточ.): 3903–01 / ЗАО «НИИТурбокомпрессор». Казань, 2001. С. 13. Инв.№ 2542.60.
31. Single-rotor screw compressor. RF Patent 212 922: MPK7 F 04 C 18/52 / Kuznetsov L. G., Kuznetsov Y. L., Pronin V. A., Burakov A. V., Bozhedomov A. V., Tsvetkov V. A. applicant and patent holder of JSC «Compressor», — application 2 022 116 811; publ. 21.06.2022, Bul. No. 23. (in Russian)
32. Prilutskiy I. K., Molodova Ju. I., Tatarenko I. V. Comparative analysis of methods for calculating heat transfer process in the compressor stages of volumetric operating principle. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-15-20 (in Russian)
33. Single-rotor screw oil-filled compressor. RF Patent 212 931: IPK7 F 04 C 18/52 / Pronin V. A., Tsvetkov V. A. applicant and patent holder ITMO University, application 2 022 118 019; publ. 01.07.2022, Bul. No. 23. (in Russian)
34. Kovanov A. V. Overview of the scroll compressor market, some aspects of technology development. *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University*. 2020. Vol. 1. pp. 113–119. (in Russian)
35. Kenji Y., Hideto N., Mihoko S. Development of Large Capacity CO₂ Scroll Compressor. *International Compressor Engineering Conference*. 2008. pp. 1189.
36. Emerson. A new class. Spiral CO₂ technology for booster systems: Our solution to your challenges. [Electronic resource]: <https://www.coolingpost.com/products/emerson-boost-for-co2-scroll-technology/> Access date: 10.11.2022.
37. Ibragimov E. R. Development of basic parameters for the construction of a number of scroll compressors: research report (interim): 3903–01 / CJSC «NiiTurbokompressor». Kazan, 2001. p. 13. Inv. No. 2542.60. (in Russian)

Сведения об авторах

Пронин Владимир Александрович

Д. т. н., профессор, ординарный профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191 002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maior.pronin@mail.ru

Кованов Александр Викторович

Главный инженер по торговому оборудованию ООО «О'КЕЙ», 195 112, Санкт-Петербург, пр. Энергетиков, 4. Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191 002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Kovanov76@yandex.ru

Цветков Вадим Александрович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191 002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, wadimsvetkov@mail.ru

Information about authors

Pronin Vladimir A.

D. Sc., Professor, Professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191 002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maior.pronin@mail.ru

Kovanov Aleksandr V.

Chief Engineer for commercial equipment LTD «O'KAY», 195 112, St. Petersburg, Energetikov Ave., 4. Graduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191 002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, Kovanov76@yandex.ru

Tsvetkov Vadim A.

Graduate student of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191 002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, wadimsvetkov@mail.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»