

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ МАЛОРАСХОДНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ДЛИННОХОДОВЫХ ПОРШНЕВЫХ СТУПЕНЕЙ

В. Л. Юша

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

Представлен обзорный анализ исследований в области воздушных и холодильных малорасходных компрессоров на базе тихоходных длинноходовых поршневых ступеней и проведена оценка научно-технологических предпосылок для повышения их энергоэффективности и конкурентоспособности. Рассмотрены два перспективных направления, в которых такие компрессоры могут найти эффективное применение: повышение давления газа от атмосферного давления до среднего и высокого давлений; реализация совмещенных процессов сжатия и конденсации хладагентов в рабочей камере ступени. Предложен и обоснован ряд научных задач, решение которых позволит создать конкурентные компрессорные агрегаты, применимые в холодильной и криогенной технике, системах термостатирования и жизнеобеспечения, в медицине и фармацевтике, в нефтехимической и нефтегазовой отраслях, в малой энергетике, на транспорте.

Ключевые слова: малорасходный компрессор, поршневая тихоходная длинноходовая ступень, рабочие процессы, среднее и высокое давление нагнетания, «квазиизотермическое» сжатие, воздух, холодильный агент, холодильный цикл, сжатие в области влажного пара.

Анализ источников информации, отражающих экспертные оценки развития компрессорной техники, показывает, что области преимущественного применения различных типов компрессоров со временем заметно меняются [1–22]. Существенное повышение технического уровня центробежных и ротационных компрессоров позволило им потеснить поршневые компрессоры во многих областях применения [11–13; 16–22 и др.]. Так, по данным [18, 22], центробежные компрессоры корпорации SAMSUNG TECHWIN способны производить сжатый воздух с давлением нагнетания 0,65...1,0 МПа уже при сравнительно небольшой производительности (11,67...50 м³/мин.), успешно конкурируя не только с поршневыми, но и с винтовыми компрессорами. А в области меньшей производительности получают преимущественное развитие ротационные компрессоры различных типов [11–14, 16, 17, 21, 22]. При этом малорасходные поршневые компрессоры по-прежнему остаются незаменимыми в области средних, высоких и сверхвысоких давлений нагнетания. Однако, несмотря на современные достижения цифрового проектирования, технологии машиностроения и материаловедения, остаются нерешёнными характерные для поршневых компрессоров проблемы [4, 5, 15, 19, 23, 24]: ограничение по величине отношения давления нагнетания к давлению всасывания в одной ступени, обусловленное температурным режимом и наличием мёртвого объёма; неуравновешенность; низкий ресурс работы клапанов и уплотнений; большое количество узлов трения; низкая технологичность, высокая удельная металлоёмкость. Анализ этих факторов привел к идее создания конструкции поршневого компрессора среднего и высокого давления на базе тихоходной длинноходовой квазиизотермической ступени [15, 25–27 и др.]. Осо-

бый интерес представляет задача создания мини- и малорасходных компрессоров такого типа, в которых, в отличие от известных прототипов [15], за счёт сверхмалого относительного мертвого объёма и длительного времени процессов сжатия и нагнетания может быть обеспечено значительное повышение давления газа в одной ступени при допустимой величине температуры нагнетания. Кроме этого, возможность интенсивного охлаждения рабочего тела при его сжатии в области влажного пара позволяет предположить также и возможность реализации совмещенных процессов сжатия и конденсации хладагента в рабочей камере ступени [28–30]. Такой уникальный термодинамический процесс предполагает увеличение холодильного коэффициента и снижение металлоёмкости конденсатора холодильного агрегата. Поскольку рабочий цикл рассматриваемой ступени длительнее, чем рабочий цикл жидкостных насосов поршневого и роторно-поршневого типа [31, 32], можно предположить, что вероятность возникновения гидравлического удара пренебрежимо мала.

На первом этапе комплексные теоретические и экспериментальные исследования были проведены по двум направлениям [26, 27, 33–36 и др.]: повышение давления газа в одной ступени от атмосферного до среднего и высокого; реализация совмещенных процессов сжатия и конденсации хладагентов в рабочей камере ступени. Остановимся подробнее на каждом из них.

Повышение давления газа в одной ступени от атмосферного до средних и высоких давлений

Первыми результатами при исследовании рабочих процессов тихоходных длинноходовых ступеней малорасходных поршневых компрессорных

Таблица 1. Влияние повышения давления в длинноходовой тихоходной ступени на её интегральные характеристики
 Table 1. Effect of pressure increase in a long-stroke low-speed stage on its integral characteristics

$P_n/P_{вс}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Примечание
$\eta_{н.ад, К}$	565	690	775	840	895	945	985	1025	1060	1090	[4, 5, 23, 28, 30]
$\eta_n, К$	298 ... 310	305 ... 325	305 ... 340	335 ... 355	340 ... 365	345 ... 370	350 ... 375	360 ... 380	365 ... 385	370 ... 390	[37 – 39]
λ	0,7 ... 0,9	0,6 ... 0,85	0,4 ... 0,8	0,3 ... 0,7	0,2 ... 0,6	0,1 0,5	— ... 0,4	— ... 0,3	— ... 0,2	— ... 0,1	[37 – 39]
КПД инд. из.	0,7 ... 0,8	0,6 ... 0,7	0,5 ... 0,6	0,3 ... 0,5	0,1 ... 0,45	— ... 0,4	— ... 0,35	— ... 0,3	— ... 0,2	— ... 0,1	[37 – 39]

агрегатов стали создание уточненной методики расчета такой ступени и разработка методики ее экспериментального исследования, выполненные научной группой С. С. Бусарова. В основе методики расчета лежит многократно апробированная в практике компрессоростроения полуэмпирическая математическая модель рабочих процессов поршневой компрессорной ступени с сосредоточенными параметрами [23]. Поскольку применяемые в этой модели эмпирические зависимости получены применительно к быстроходным ступеням с относительно небольшой величиной [4, 5, 24 и др.], был проведен комплекс экспериментальных исследований, позволивших получить уточненные эмпирические зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи в рабочей камере исследуемой ступени, для расчета массовых потоков рабочего газа через уплотнение цилиндра-поршневой группы и через закрытые клапаны. Кроме этого, математическая модель включает в себя расчет нестационарного процесса теплопередачи через стенки рабочей камеры ступени. Методика расчета также включает в себя дополнительные модули, позволяющие моделировать различные законы перемещения поршня, циклическую деформацию стенок рабочей камеры, а также эластомерных элементов клапанов и цилиндра-поршневого уплотнения. Методика расчета верифицирована по результатам сравнения с оригинальными экспериментальными данными. Наиболее полное описание вновь разработанных экспериментальных и теоретических методов исследования представлено в работах [27, 33, 37 – 44 и др.].

Важным методологическим результатом является также разработанная инженерная методика расчёта действительной производительности тихоходных длинноходовых поршневых компрессорных ступеней, основанная на принципах схематизации рабочих процессов и разделения потерь, которая позволила выявить существенное отличие величины условных показателей политропы и количественного соотношения между отдельными составляющими потерь производительности по сравнению с известными методиками расчёта быстроходных ступеней [36, 45, 46].

Наиболее значимым из полученных результатов стало экспериментальное и теоретическое подтверждение предположения о возможности повышения давления однокомпонентного однофазного рабочего тела в одной ступени до средних и высоких величин при обеспечении допустимой температуры нагнетания (табл. 1), то есть возможность реализации «квазиизотермического» процесса сжатия однофазного рабочего тела при интенсивном внешнем охлаждении ступени. Ведь до сих пор считалось, что практическая реализация «квазиизотермического» сжатия возможно лишь при впрыске охлаждающей жидкости в рабочую камеру [47, 48 и др.].

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, при сжатии воздуха в тихоходной ступени от атмосферного примерно до 4,0...5,0 МПа температура нагнетания несоизмеримо ниже, чем если бы такое повышение давления производилось адиабатно. При этом обеспечивается величина коэффициента подачи и изотермического индикаторного КПД в приемлемом для практической реализации диапазоне 0,5...0,8. Дальнейшее увеличение давления нагнетания (до $P_n/P_{вс} = 100$) показывает, что температурный режим также существенно лучше, чем при адиабатном сжатии; однако однозначные

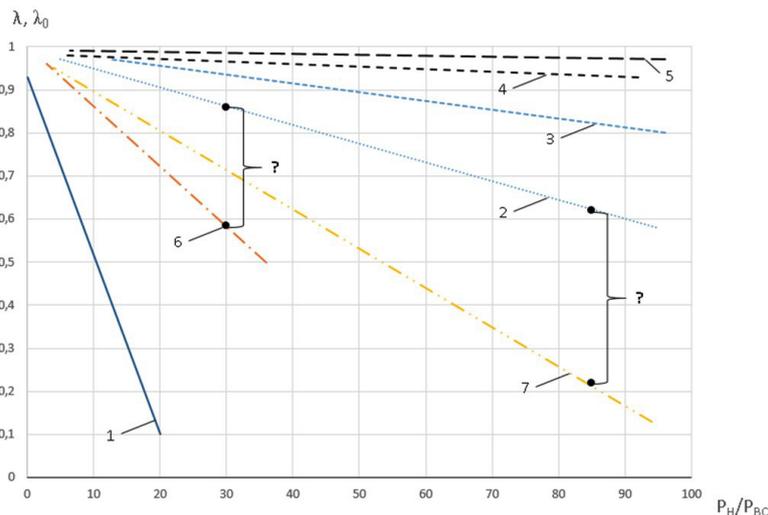


Рис. 1. Влияние величины отношения давления нагнетаемого воздуха к давлению всасывания и величины относительного мёртвого объёма на λ_0 и λ : 1...5 — λ_0 (1 — $a_m = 0,1$; 2 — $a_m = 0,01$; 3 — $a_m = 0,005$; 4 — $a_m = 0,001$; 5 — $a_m = 0,0005$); 6, 7 — λ ($a_m = 0,01$)

Fig. 1. Influence of the value of the ratio of the pressure of the discharged air to the suction pressure and the value of the relative dead volume on λ_0 and λ : 1...5 — λ_0 (1 — $a_m = 0,1$; 2 — $a_m = 0,01$; 3 — $a_m = 0,005$; 4 — $a_m = 0,001$; 5 — $a_m = 0,0005$); 6, 7 — λ ($a_m = 0,01$)

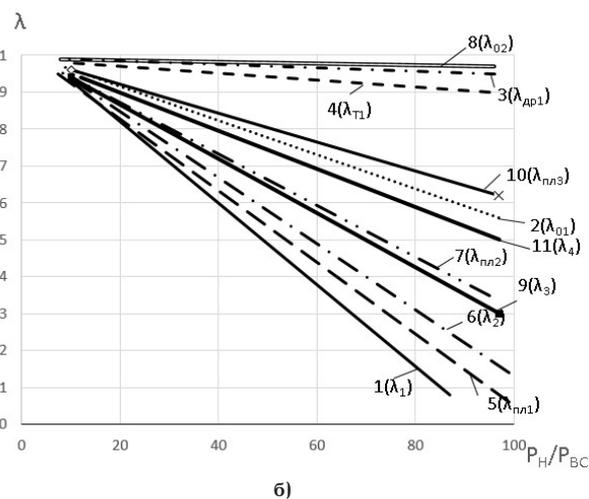
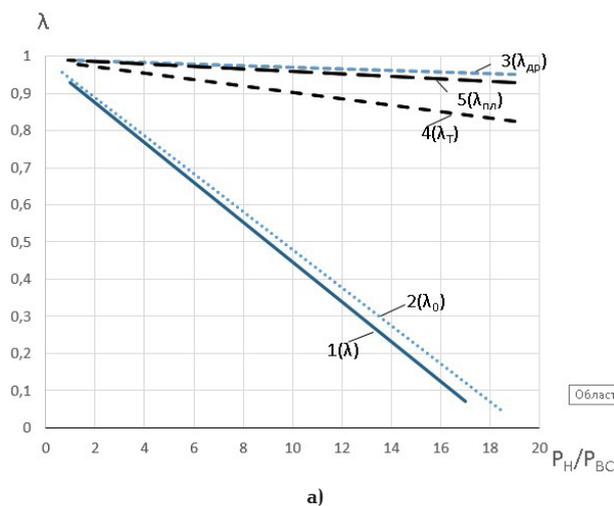


Рис. 2. Структура потерь производительности поршневой компрессорной ступени: а) быстроходная ступень ($a_m = 0,1$); б) тихоходная длинноходовая ступень ($a_m = 0,01$)

Fig. 2. The structure of performance losses of the reciprocating compressor stage: а) high-speed stage ($a_m = 0,1$); б) low-speed long-stroke stage ($a_m = 0,01$)

выводы при этом делать некорректно, так как при таких режимах коэффициент подачи снижается до недопустимо малых значений. Эффективное охлаждение, возможно, обеспечивается за счет уменьшения массы нагнетаемого воздуха при сохранении интенсивного теплоотвода. То есть подтверждена физическая возможность сжатия газа в ступени от 0,1 МПа до 10,0 МПа, однако обеспечение энергоэффективности этого процесса требует дополнительных исследований и новых технических решений.

Выявленное резкое снижение эффективности рабочего процесса при больших отношениях P_H/P_{BC} стало достаточно неожиданным результатом. Ведь, согласно известной теории поршневых компрессоров [4, 5, 23 и др.], a_m является основным фактором снижения производительности при повышении отношения давления нагнетания к давлению всасы-

вания. И при фиксированном абсолютном мертвом объеме увеличение ψ должно было привести к существенному уменьшению относительного мертвого объема и, соответственно, к пренебрежимо малым потерям производительности (рис. 1). Однако фактический коэффициент подачи при больших отношениях P_H/P_{BC} даже при небольшом относительном мертвом объеме ($a_m = 0,01$) оказался недопустимо мал. Логично предположить, что, применительно к рассматриваемой тихоходной ступени, на потери производительности возросло влияние других факторов. На рис. 2а представлена структура потерь производительности, соответствующая известным рекомендациям для быстроходных поршневых ступеней [4, 5, 23 и др.], на рис. 2б — структура потерь производительности, соответствующая полученным результатам исследований тихоходной поршневой ступени [36, 45].

На рис. 2а введены следующие обозначения, характеризующие потери производительности быстроходной ступени: 1 — λ ; 2 — λ_0 ; 3 — $\lambda_{\text{ДР}}$; 4 — $\lambda_{\text{Т}}$; 5 — $\lambda_{\text{П}}$. На рис. 2б использованы следующие обозначения, характеризующие потери производительности быстроходной ступени: 1 — λ ; 2 — λ_0 при $a_m=0,01$; 3 — $\lambda_{\text{ДР}}$; 4 — $\lambda_{\text{Т}}$; 5 — $\lambda_{\text{П}}$; 6 — λ при повышенной герметичности эластомерных клапанов и уплотнений ЦПГ; 7 — $\lambda_{\text{П}}$ при повышенной герметичности эластомерных клапанов и уплотнений ЦПГ; 8 — λ_0 при $a_m=0,001$; 9 — λ при $a_m=0,001$ и при повышенной герметичности эластомерных клапанов и уплотнений ЦПГ; 10 — $\lambda_{\text{П}}$ при улучшенной компоновке клапанов и при повышенной герметичности эластомерных клапанов и уплотнений ЦПГ; 11 — λ при повышенной герметичности эластомерных клапанов и уплотнений ЦПГ, улучшенной компоновке клапанов и $a_m=0,001$.

Как видно из представленных на рис. 2б результатов, в отличие от быстроходных ступеней (рис. 2а), в тихоходных ступенях потери производительности (кривая 1) определяются, главным образом, негерметичностью рабочей камеры (кривая 5). По результатам проведенных исследований в качестве одной из рекомендаций было предложено повысить герметичность клапанов и поршневых уплотнений путем применения эластомерных элементов [41, 42, 49]. Их применение в рассматриваемых ступенях становится возможным благодаря низким температурам нагнетания. Деформируемые конструкционные материалы позволяют обеспечить не только плотное прилегание сопрягаемых поверхностей седла и запорного органа клапан, но и уменьшить периметр щели при закрытом клапане [41]. По предварительным оценкам такое техническое решение позволяет снизить перетечки газа через закрытый клапан на 10...30 % и несколько повысить величину $\lambda_{\text{П}}$ (кривая 7) и λ (кривая 6). Снижение величины относительного мертвого объема с 0,01 до 0,001 (кривая 8) также позволяет повысить λ (кривая 9). И это уже заметное повышение коэффициента подачи по сравнению с исходным вариантом (кривая 1), однако еще недостаточное, чтобы обеспечить требуемую для практической реализации эффективность рабочего процесса в области высоких давлений.

Выбор рациональных величин основных размеров и параметров ступени также позволяет повысить величину λ и, соответственно, обеспечить его максимально достижимую величину при конкретном режиме работы [34, 36, 37, 38, 45 и др.]. Это не противоречит выявленному по результатам проведенных исследований определяющему влиянию $\lambda_{\text{П}}$ на потери производительности ступени. Более того, представленные результаты приводят к необходимости в качестве основного фактора, определяющего эффективность рабочего процесса объекта исследования, рассматривать разность давлений нагнетания и всасывания (от которой зависит интенсивность перетечек через неплотности рабочей камеры) [50], а не их отношение (как это принято в быстроходных компрессорах) [4, 5, 23 и др.]. Это принципиально важно в теоретическом плане и, безусловно, требует дальнейшего исследования и анализа.

Выбор привода является одной из важнейших задач при разработке малорасходных компрессорных агрегатов на базе тихоходных длинноходовых ступеней. Из всего многообразия существующих линейных приводов на сегодняшний день практиче-

ски значимым является гидропривод [38, 44, 51–53 и др.]. Безусловно, наличие дополнительной гидравлической приводной системы усложняет конструкцию компрессорного агрегата. Однако имеет и ряд неоспоримых преимуществ, в том числе позволяет реализовать рабочий цикл компрессорной ступени при переменной скорости поршня. При этом закон перемещения поршня возможно задавать в широком диапазоне изменения мгновенных скоростей. Увеличение скорости поршня в процессе всасывания и на начальном участке процесса сжатия при снижении скорости поршня на завершающем участке процесса сжатия и в процессе нагнетания позволяет снизить подогрев рабочего газа от стенок цилиндра, что обеспечивает снижение температуры нагнетания на 15...25 К и повышение производительности на 5...10 %; позволяет при изменении газовой силы в ступени в 10 раз улучшить динамические характеристики агрегата за счет снижения мгновенной мощности до 3 раз по сравнению с режимом работы агрегата при постоянной скорости поршня; при этом снизить установленную мощность приводного электродвигателя до 3 раз, а массу и стоимость агрегата — примерно на 10...30 % и на 15 % соответственно [38].

Отметим, что в случае увеличения давления нагнетания при любом усложнении конструкции рассматриваемой ступени остаётся актуальной задача обеспечения минимально достижимой величины относительного мертвого объема. Как видно из рис. 1, при a_m менее 0,1 % (кривые 4, 5) величина объёмного коэффициента остаётся больше 0,9 даже при высоких давлениях нагнетания; а при средних давлениях влияние мертвого объема на потери производительности пренебрежимо мало. В проведённых ранее исследованиях на экспериментальных образцах ступеней удалось добиться величины a_m менее 1 % при отношении $\psi=10$. Поскольку абсолютная величина мертвого объема определяется в том числе мёртвым объёмом клапанов, ее дальнейшее снижение имеет физические ограничения. Поэтому для снижения величины a_m до значений меньших 0,1 % необходимо увеличивать ψ до более высоких значений. В несмазываемых ступенях с конструкцией, аналогичной экспериментальным образцам, обеспечение ψ существенно больше 10 нецелесообразно, так как влечет за собой значительное увеличение габаритного осевого размера агрегата и предполагает усложнение технологии изготовления цилиндра. В этом случае может оказаться эффективным применение так называемого «жидкостного поршня» [54–57 и др.]. Наряду с известными недостатками такой конструкции применительно к рассматриваемому объекту у нее есть существенные достоинства: теоретически может быть обеспечена сколь угодно малая величина a_m , при этом осевой габаритный размер может быть существенно снижен за счет выполнения оси цилиндра криволинейной; диаметр цилиндра может быть выполнен также сколь угодно малым, что обеспечит охлаждение газа с повышенной интенсивностью; рабочий процесс может быть реализован одновременно в нескольких сообщающихся между собой цилиндрах, что обеспечит требуемый описанный объем при увеличении коэффициента плотности.

Наряду с упомянутыми выше вариантами увеличения герметичности клапанов и поршневого уплотнения [41, 42, 49] целесообразно рассмотреть вопрос о влиянии компоновки органов газораспределения на герметичность ступени. Принципиаль-

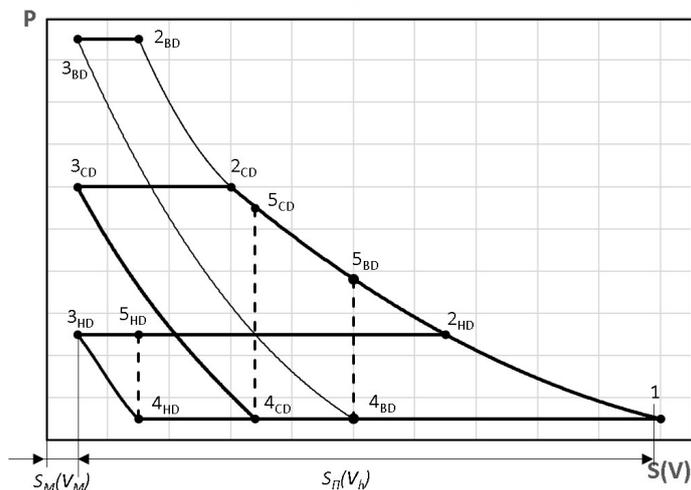


Рис. 3. Индикаторные диаграммы низкого (НД), среднего (СД) и высокого (ВД) давления со стандартной (2НД, 2СД, 2ВД) и усовершенствованной (5НД, 5СД, 5ВД) компоновкой клапанов всасывания

Fig. 3. Low (LP), medium (MP) and high (HP) pressure indicator diagrams with standard (2ND, 2SD, 2VD) and advanced (5ND, 5SD, 5VD) suction valve arrangements

ная постановка этой задачи проиллюстрирована на рис. 3, на котором для ступени с неизменной величиной описанного объема и неизменной величиной мёртвого объема представлены индикаторные диаграммы для трех режимов: режим работы с низким давлением нагнетания (НД), со средним давлением нагнетания (СД) и с высоким давлением нагнетания (ВД).

При обычной компоновке клапанов всасывания и нагнетания в области мертвого объема перетечки между рабочей камерой ступени и камерой нагнетания через закрытый клапан нагнетания происходят на участках 1-2, 3-4, 4-1 индикаторной диаграммы, а через закрытый клапан всасывания перетечки между рабочей камерой ступени и камерой всасывания происходят на участках 1-2, 2-3, 3-4. Интегрально эти перетечки в основном и определяют негерметичность ступени и крайне низкую величину коэффициента плотности (рис. 2б). Перемещение клапана нагнетания в рабочей камере ступени по понятным причинам не рассматривается. А клапан всасывания логично было бы разместить на некотором расстоянии от клапанной плиты, когда заканчивается процесс обратного расширения (точка 4 на рис. 3). При этом, в отличие от обычной схемы, через закрытый клапан всасывания перетечки между рабочей камерой ступени и камерой всасывания происходят на участках индикаторной диаграммы 1-5 (для режимов СД и ВД) и 1-2-5 (для режима НД). Как видно из рис. 3, для режима низкого давления перемещение клапана всасывания практически не отразится на длительности процесса перетечек через него. Но для режимов среднего и высокого давления эта длительность снижается примерно в 4 и более раз, что может заметно повлиять на увеличение коэффициента плотности и коэффициента подачи в целом (кривые 10 и 11 на рис. 2б). Наиболее эффективно это может быть реализовано в схеме с «жидкостным поршнем», при которой в качестве дополнительного положительного фактора полностью исключаются перетечки через поршневое уплотнение. С учетом вышеизложенного можно предположить, что энергетически эффективный рабочий процесс в малорасходной тихоходной

длинноходовой ступени в ближайшей перспективе возможен при перепаде давлений между нагнетанием и всасыванием до 10,0...15,0 МПа. На базе таких ступеней можно компоновать многоступенчатые агрегаты для получения более высоких, в том числе сверхвысоких давлений.

Сравнительный анализ характеристик поршневых и мембранных малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления отечественных и зарубежных производителей (ООО ЧКЗ (г. Челябинск), J. A. Becker&Sohne (Германия), АО «Компрессор» (г. Санкт-Петербург), Andreas Hofer Hochdrucktechnik GmbH (Neuman&Esser Group) (Германия), АО «УКЗ» (г. Екатеринбург), НПП «Ковинт» (г. Санкт-Петербург) и др.) показывает, что прогнозные массогабаритные характеристики компрессорных агрегатов на базе тихоходных длинноходовых ступеней значительно превосходят характеристики мембранных аналогов и соизмеримы с характеристиками быстроходных многоступенчатых поршневых аналогов; при этом агрегаты на базе тихоходных длинноходовых ступеней имеют безусловное преимущество по ресурсу и технологичности [34, 37, 38, 39, 49, 50, 51, 58, 59 и др.]. Это преимущество может быть усилено за счет реализации конструктивной схемы с гидроприводом, встроенным в цилиндр компрессорной ступени (далее — «капсульная» схема). Ее основными преимуществами являются абсолютная герметичность (что особенно важно для химических, нефтегазовых и нефтеперерабатывающих производств, а также в ряде других отраслей), а также улучшенные габаритные характеристики (осевая длина «капсульного» компрессорного агрегата по сравнению с раздельно вынесенными компрессорной ступенью и гидроцилиндром меньше примерно в 2 раза, в том числе по сравнению с известными промышленными аналогами [15]).

Принципиальная схема «капсульной» конструкции ступени поршневого компрессора с встроенным гидроприводом известна достаточно давно [60—62 и др.], но применительно к рассматриваемой тихоходной длинноходовой схеме она становится особенно актуальной.

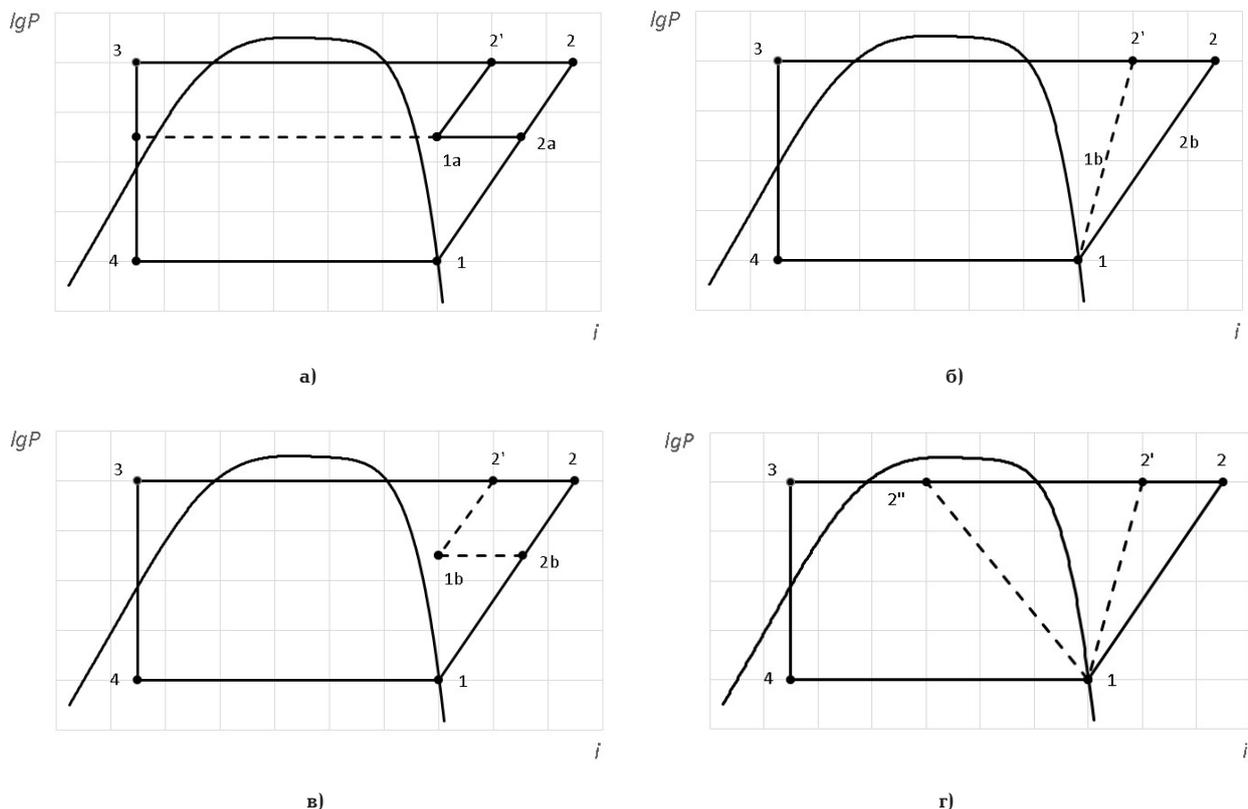


Рис. 4. Варианты повышения энергоэффективности и снижения теплонапряженности холодильных компрессорных ступеней:
 а — замена одноступенчатого сжатия на многоступенчатое; б — впрыск охлаждающей жидкости в рабочую камеру;
 в — подача хладагента в рабочую камеру в процессе сжатия;
 г — совмещенные процессы сжатия и конденсации хладагента

Fig. 4. Options for improving energy efficiency and reducing the heat stress of refrigeration compressor stages:
 а — replacement of single-stage compression with a multi-stage one;
 б — injection of coolant into the working chamber; в — supply of refrigerant to the working chamber during compression;
 г — combined processes of compression and condensation of the refrigerant

Реализация в поршневой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени совмещенных процессов сжатия и конденсации хладагентов

При реализации пароконденсационных циклов с повышенным отношением величины давления конденсации к величине давления кипения возрастают необратимые потери, температура нагнетания, газовые силы. На рис. 4 представлено несколько способов повышения эффективности работы холодильных машин при таких рабочих режимах.

Наиболее известными технологиями, снижающими температурные нагрузки, являются применение многоступенчатых холодильных циклов [63–64 и др.] (рис. 4а) и впрыск в компрессорную ступень масла в качестве охлаждающей жидкости [65 и др.] (рис. 4б). Применение многоступенчатых циклов снижает, кроме этого, потери производительности и газовые нагрузки в ступени; впрыск масла снижает потери производительности. Разработаны технологии, при которых в рабочую камеру компрессора подается жидкая фракция хладагента (технология Controlled Injection Cooling (CIC)) или его паровая фаза (технология Enhanced Vapor Injection (EVI)) [66–76 и др.]. Если жидкий хладагент подается в начале процесса сжатия, реализуются рабочие процессы, близкие к впрыску масла (рис. 4б); но при этом интенсивное охлаждение сжимаемо-

го хладагента обеспечивается за счет полного испарения жидкой фракции. Технология CIC нашла применение в компрессорах BITZER и позволяет снизить тепловые нагрузки при повышении температуры конденсации. На рис. 4в представлена технология EVI, при которой подача дополнительного потока хладагента в виде перегретого пара в компрессор осуществляется на части хода сжатия. Для этого часть жидкости после конденсатора (10...25 %) направляют в дополнительный теплообменник, где она выкипает и поступает обратно в компрессор. Технология EVI применяется в компрессорах LG, Copeland, Mitsubishi Electric и других.

Представленные выше результаты эффективного «внешнего» охлаждения тихоходной длинноходовой поршневой ступени позволяют предположить, что при сжатии хладагента в области влажного пара при его интенсивном охлаждении возможна одновременная реализация процессов сжатия и конденсации этого хладагента. Следует отметить, что в известных источниках информации упоминаются совмещенные процессы сжатия и конденсации [77, 78], однако информация об исследованиях такой технологии или ее реализации применительно к холодильной технике отсутствует. Из рис. 4г видно, что она могла бы обеспечить не только снижение температуры нагнетания компрессора, но также повысить энергоэффективность холодильного цикла и снизить площадь теплообмен-

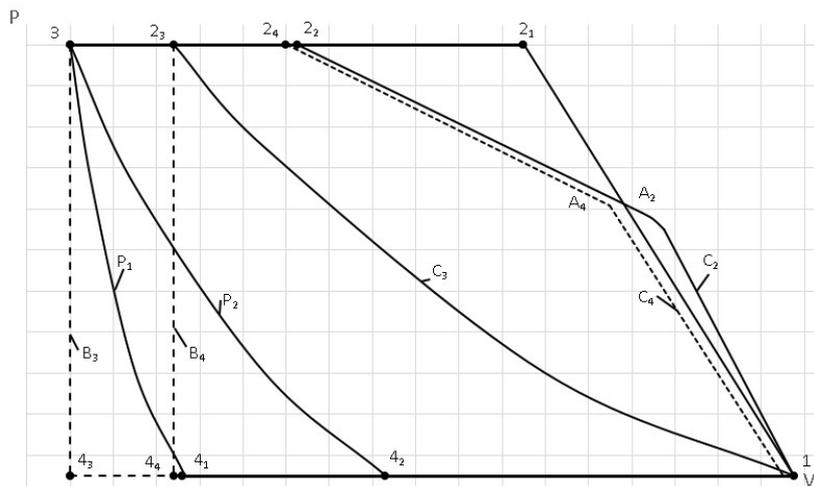


Рис. 5. Варианты реализации рабочего цикла и основных рабочих процессов холодильного компрессора при адиабатном сжатии и при совмещённых процессах сжатия и конденсации хладагента в области влажного пара
 Fig. 5. Variants of the implementation of the working cycle and the main working processes of the refrigeration compressor with adiabatic compression and with combined processes of compression and condensation of the refrigerant in the wet vapor area

ной поверхности конденсатора. Можно предположить, что при обеспечении требуемых режимных и конструктивных параметров могут быть получены результаты, соизмеримые не только с результатами упомянутых выше технологий (процесс 1-2' на рис. 4г), но и обеспечивающие конденсацию хладагента непосредственно в рабочей камере ступени (процесс 1-2'' на рис. 4г).

По сравнению с перечисленными выше технологиями одновременное сжатие и конденсация хладагента в рабочей камере компрессорной ступени имеет ряд преимуществ: по сравнению с многоступенчатым циклом — более простая конструкция компрессорного агрегата (одна компрессорная ступень, отсутствие межступенчатых коммуникаций и теплообменников), меньше потерь энергии на преодоление газодинамических потерь в клапанах и межступенчатых коммуникациях; по сравнению с впрыском масла — более простая конструкция компрессорно-конденсаторного агрегата (отсутствует маслоохладитель), отсутствуют потери энергии на преодоление гидравлических потерь в маслосистеме и в компрессорной ступени, более высокий коэффициент теплопередачи в конденсаторе и испарителе (отсутствие масляной пленки в проточной части); по сравнению с СИС- и EVI-технологиями — снижение энергозатрат на повторное компримирование хладагента.

В работах [79–82] предпринята попытка теоретического анализа эффективности совмещенных процессов сжатия и конденсации аммиака и возможных научных подходов к ее исследованию. Был выполнен анализ факторов неопределенности, влияющих на результаты теоретических исследований рабочих процессов поршневой аммиачной тихоходной длинноходовой компрессорной ступени в области влажного пара. Наиболее значимыми из них являются степень сухости хладагента в начале процесса обратного расширения, температурное поле поверхностей рабочей камеры ступени, а также методика расчёта коэффициента теплоотдачи при кипении или конденсации хладагента в рабочей камере.

Многообразие существующих методик расчета искомого коэффициента теплоотдачи [79–83 и др.] привело к необходимости сравнительного анализа применимости наиболее характерных методик и типов схематизации процессов кипения и конденсации в рабочей камере рассматриваемой ступени. Выявлено существенное отличие количественных результатов [80–82] как для разных типов схематизации, так и для различных методик в рамках отдельных схематизаций. Например, расчетные величины объема рабочей камеры и степени сухости аммиака в конце процесса обратного расширения могут отличаться в несколько раз в зависимости от применяемой схематизации и методики расчета процесса теплообмена, а в пределах одного типа схематизации это отличие может составлять 30...60 %. Не менее существенное отличие расчетных результатов имеет место при произвольном изменении величины степени сухости аммиака в начале процесса обратного расширения в качестве начального условия в рамках применения одной методики расчета процесса теплообмена [80–82], а также при произвольном задании величины температуры стенки в качестве граничного условия [80–81].

Очевидно, что такое расхождение расчетных результатов, обусловленное существенной неопределённостью при формировании методики расчета рабочих процессов ступени в области влажного пара, а также начальных и граничных условий, не позволяет на данном этапе выполнить корректную количественную оценку эффективности исследуемых рабочих процессов и предполагает поведение дополнительных экспериментальных исследований. Вместе с тем выявленные качественные взаимосвязи между отдельными факторами позволяют сформулировать задачи, решение которых обеспечит конкурентоспособность технологии одновременного сжатия и конденсации хладагента в рабочей камере компрессорной ступени по сравнению с существующими. На рис. 5 обобщенно представлены некоторые характерные процессы, выявленные по результатам проведенных расчетно-теоретических исследований [79–82]: процессы

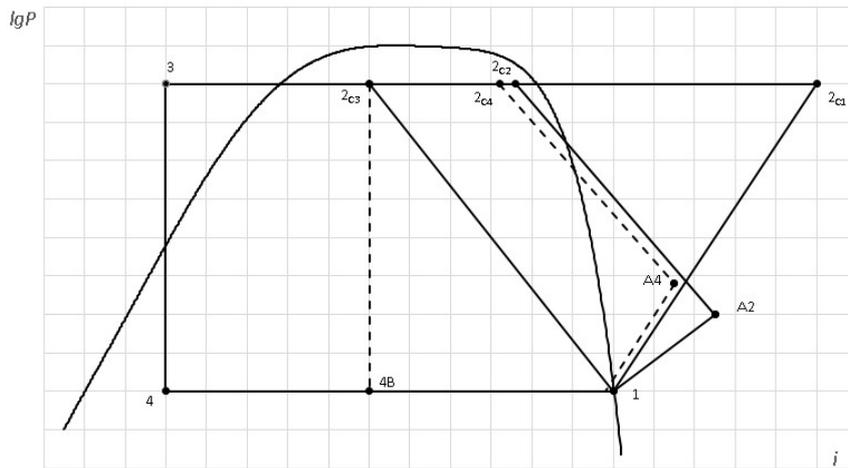


Рис. 6. Сравнение вариантов реализации холодильного цикла при совмещенных процессах сжатия и конденсации хладагента в области влажного пара с холодильным циклом при адиабатном сжатии
Fig. 6. Comparison of options for the implementation of the refrigeration cycle with combined processes of compression and condensation of the refrigerant in the area of wet vapor with the refrigeration cycle with adiabatic compression

обратного расширения ($P1$ — адиабатный, $P2$ — длительный при интенсивном внешнем охлаждении и наличии жидкой фазы в начале процесса; процессы нагнетания ($H1=2_1-3$, $H2=2_2-3$, $H3=2_3-3$, $H4=2_4-3$); процессы всасывания ($BC1=4_1-1$, $BC2=4_2-2$, $BC3=4_3-1$); процессы сжатия ($C1=1-2_1$ — адиабатный; $C2=1-A_2-2_2$ — при равномерной скорости поршня и интенсивном внешнем теплообмене (подводе и отводе тепла); $C3=1-2_3$ — при равномерной скорости поршня и постоянном интенсивном внешнем теплоотводе; $C4=1-A_4-2_4$ — при переменной скорости поршня (адиабатно при температуре аммиака ниже температуры стенки и с интенсивным теплоотводом при температуре аммиака выше температуры стенки). Кроме этого, здесь представлены процессы выхлопа влажного пара в область низкого давления [30]: $V3$ — из мёртвого объёма (дополнительный к нагнетанию), $V4$ — из рабочей камеры в конце процесса сжатия (без нагнетания). Процессу $V4$ соответствует процесс выталкивания влажного пара из рабочей камеры $VH=4_4-4_3$.

Из представленных результатов следует, что при медленном процессе обратного расширения влажного пара имеют место значительные потери холодопроизводительности ($P2$), а при медленном равномерном процессе сжатия — подогрев сжимаемого рабочего тела на начальном участке сжатия ($C2$). Соответственно, одной из первоочередных задач является определение закона перемещения поршня, обеспечивающего минимальный подвод тепла в процессах обратного расширения, всасывания и на начальном участке сжатия, а также максимальный теплоотвод в процессах нагнетания и сжатия (при температуре рабочего тела выше температуры стенок рабочей камеры). При этом холодильный коэффициент может быть увеличен на 5...10 % по сравнению с быстроходной ступенью и на 20...25 % по сравнению с тихоходной длинноходовой ступенью, в которой поршень движется равномерно. При снижении температуры стенки до температуры кипения это увеличение может достигать 50 %. Одним из способов снижения температуры стенки может стать использование части жидкого хладагента из конденсатора (по аналогии с упомянутыми выше технологиями $C1C$ и EVI). В нашем

случае представляет интерес также и реализация компрессорного цикла с дополнительным процессом выхлопа влажного пара из мертвого объема (процесс $V3$ на рис. 5). Такой цикл обеспечивает увеличение холодильного коэффициента примерно на 10 % и холодопроизводительности на 15...20 % по сравнению с быстроходной ступенью. При этом дополнительный процесс выхлопа обеспечивает и дополнительную холодопроизводительность. В качестве одного из вариантов она может быть использована для понижения температуры стенок рабочей камеры ступени (в отличие от EVI , отбор жидкого хладагента из конденсатора не требуется). В этом случае холодильный коэффициент может быть увеличен более чем в 1,5 раза. Из рис. 6, на котором процессы $1-2C1$, $1-A2-2C2$, $1-2C3$, $1-A4-2C4$, $2C3-4B$ соответствуют процессам $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $V4$ на рис. 5, видно, что величина дополнительной холодопроизводительности зависит в том числе от степени сухости влажного пара в конце процесса нагнетания (процесс $2C3-4B$).

Вытекающим из этого следствием является предположение о возможности работы холодильного компрессора без процесса нагнетания (полный выхлоп после окончания процесса сжатия с использованием принудительного газораспределения (процесс $V4$ на рис. 5 и процесс $2C3-4B$ на рис. 6)). Из представленных рисунков видно, что реализация такой технологии ведёт к снижению холодопроизводительности, но позволяет уменьшить индикаторную работу. Очевидно, что при этом энергоэффективность холодильного цикла будет зависеть от величины степени сухости влажного пара в конце процесса сжатия. Для рассмотренных в [80–82] режимных и конструктивных параметров компрессорной ступени при степени сухости перед выхлопом меньше 0,5 предложенная технология обеспечивает холодильный коэффициент выше, чем у быстроходной ступени (при полном отсутствии конденсатора); а при степени сухости меньше 0,3 — выше, чем у лучшей из описанных выше. Специфика данной технологии не предполагает возможности значительного удаления компрессора от испарителя; соответственно, можно ожидать известных ограничений при ее практическом при-

менении (преимущественно компактные системы небольшой холодопроизводительности: холодильники, кондиционеры, криомедицинские установки, низкотемпературные технологические установки и др.). Тем не менее приведенные прогнозные ожидания по повышению энергоэффективности малых холодильных машин предполагают актуальность проведения комплексных исследований компрессорных и холодильных циклов с применением как полного, так и дополнительного выхлопа.

Заклучение

По результатам представленного анализа можно отметить, что в ближайшей перспективе целесообразна разработка и практическое применение одноступенчатых мини- и малорасходных компрессорных агрегатов среднего давления на базе тихоходной длинноходовой ступени, в которой давление газа повышается от атмосферного до 3,0...5,0 МПа при температурах нагнетания, не превышающих 340...400 К. Для эффективной реализации в одной ступени режимов с более высокими отношениями давления нагнетания к давлению всасывания (до 10,0...15,0 МПа) имеются очевидные предпосылки.

Несмотря на то, что результаты проведенных исследований уже сейчас позволяют оценить взаимосвязь между основными конструктивными и режимными факторами поршневых тихоходных длинноходовых ступеней, можно ожидать появления новых актуальных научных задач, требующих своего решения. В частности, необходимы более глубокие исследования механических, тепловых и трибологических процессов, происходящих в деформируемых эластомерных конструктивных элементах ступени, их влияния на такие ее интегральные характеристики, как ресурс, потери мощности на механическое трение, потери производительности и др. При разработке «капсульной» схемы появляется интересная исследовательская задача, связанная с изучением рабочих процессов компрессорной ступени с циклически возобновляемой плёнкой охлаждающей жидкости на внутренней поверхности рабочей камеры и интенсивным испарительным охлаждением компримируемого газа. Кроме этого, с учётом высокой технологичности, ремонтпригодности и надежности тихоходных длинноходовых ступеней, перспективной задачей является и практическая реализация «капсульной» схемы, которая могла бы стать базовым элементом для отраслевой унификации и обеспечила бы существенное снижение номенклатуры деталей и узлов, требующих периодического ремонта или замены.

Интересным направлением с научной и практической точек зрения является исследование рабочих процессов в области влажного пара, реализуемых в поршневой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени с интенсивным внешним охлаждением. При этом предполагается, в качестве гипотезы, что процессы сжатия и конденсации хладагента в рабочей камере ступени протекают одновременно, чего не происходит в быстроходных компрессорах. Ожидаемый эффект может быть усилен при использовании компрессорных циклов с дополнительным выхлопом влажного пара в конце процесса нагнетания из мертвого объема или с полным выхлопом в конце процесса сжатия.

Представленный в статье анализ результатов и перспективных задач может быть полезен для специалистов в области разработки и исследования

Таблица 2. Условные обозначения и индексы
Table 2. Symbols and indexes

Обозначение	Наименование	Единица измерения
a_m	Относительный мёртвый объём	
λ	Коэффициент подачи	
λ_0	Объёмный коэффициент	
$\lambda_{др}$	Коэффициент дросселирования	
λ_t	Температурный коэффициент	
$\lambda_{пл}$	Коэффициент плотности	
ψ	Отношение величины хода поршня к величине диаметра цилиндра	
P	Давление	Па
T	Температура	К
вс, н	всасывание, нагнетание	
ад., из.	адиабатный, изотермический	
инд.	индикаторный	

малорасходных воздушных, газовых и холодильных компрессоров и систем на их базе.

Список источников

- Остергаг П. Компрессоры и воздухоудвки: пер. с нем. В 2 т. 2-е изд. Москва-Ленинград: ГОНТИ, 1931. Т. 1. 208 с.
- Александров В. И., Бадилькес И. С., Василенко И. Ф. [и др.]. Машиностроение. Энциклопедический справочник. В 15 т. / под ред. Е. А. Чудакова, А. К. Мартенса. Москва: МАШГИЗ, 1948. Т. 12. 330 с.
- Шерстюк А. Н. Компрессоры. Москва: Госэнергоиздат, 1959. 191 с.
- Захаренко С. Е., Анисимов С. А., Дмитриевский В. А. [и др.]. Поршневые компрессоры / под ред. С. Е. Захаренко. Москва-Ленинград: Машгиз, 1961. 455 с.
- Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1969. 744 с.
- Видякин Ю. А., Доброклонский Е. Б., Кондратьева Т. Ф. Оппозитные компрессоры. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1979. 279 с.
- Михайлов А. К., Ворошилов В. П. Компрессорные машины. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 288 с.
- АО «Компрессор». URL: <http://www.compressor.spb.ru/contact.html> (дата обращения: 18.05.2022).
- Справочник химика 21. URL: <https://www.chem21.info/> (дата обращения: 03.04.2022).
- Эффективные решения для различных областей применения. URL: <https://www.bitzer.de/ru/ru/применения/> (дата обращения: 05.04.2022).
- We engineer tomorrow to build a better future. URL: <https://www.danfoss.com> (дата обращения: 02.06.2022).
- Home of industrial ideas. URL: <https://www.atlascopco.com> (дата обращения: 12.04.2022).
- Компрессорные системы. URL: <https://www.ingersollrand.com> (дата обращения: 18.02.2022).
- Engineering for a better word. URL: <https://www.gea.com> (дата обращения: 11.05.2022).

15. Производство компрессоров Hofer. URL: <https://www.andreas-hofer.ru> (дата обращения: 18.02.2022).
16. Компрессорное оборудование. URL: <https://www.compressor.net.ru> (дата обращения: 11.03.2022).
17. Climate technologies worldwide. URL: <https://www.climate.emerson.com> (дата обращения: 11.05.2022).
18. Челябинский компрессорный завод. URL: <https://www.chkz.ru> (дата обращения: 10.06.2022).
19. Leading compressor technology and system. URL: <https://www.burckhardtcompression.com/> (дата обращения: 22.04.2022).
20. Global MYCOM. URL: <https://www.mayekawa.com> (дата обращения: 22.04.2022).
21. Промышленные компрессоры Mattei. URL: <http://www.mattei-it.ru/kompressor/> (дата обращения: 26.04.2022).
22. Development team since 1999. URL: <https://www.ctkeuro.ru> (дата обращения: 19.05.2022).
23. Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. Москва: КолосС, 2006. 456 с.
24. Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции. Москва: КолосС, 2008. 711 с.
25. Shi Jian. Compressor with liquid piston. CN patent 102953955 A; published June 6th, 2013.
26. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyj A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 113. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.333.
27. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, Issue 3. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5.
28. Кириллин В. А., Сычёв В. В., Шейнцлин А. Е. Техническая термодинамика. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 407 с.
29. Богданов С. Н., Бучко Н. А., Гуйго Э. И. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен. Москва: Агропромиздат, 1986. 320 с.
30. Bosnjakovic F., Knoche K. F. Technische Thermodynamik: Teil I. Darmstadt; Steinkopff, 1998. 543 p.
31. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. Москва: Машиностроение, 1971. 672 с.
32. Vickers — гидравлическое оборудование для промышленного и мобильного применения. URL: <https://www.vickers.ru> (дата обращения: 02.06.2022).
33. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Y. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.
34. Юша В. Л., Бусаров С. С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходных ступеней // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.
35. Юша В. Л., Бусаров С. С., Чернов Г. И. Теоретическая оценка влияния систем охлаждения и рекуперации на энергоэффективность компрессорных агрегатов на базе поршневых длинноходных ступеней // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 2. С. 35–44.
36. Yusha V. L., Busarov S. S., Filkin N. Yu., Fedorova M. A., Denisenko V. V., Goncharenko A. A., Shipov V. B., Bessonov O. G. Implementing the principles of operating processes schematization and of performance loss distribution when desiging long-stroke reciprocating compressor stages // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012016.
37. Громов А. Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 213 с.
38. Недовенчаный А. В. Повышение энергетической и динамической эффективности поршневого малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным приводом: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 232 с.
39. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Гошля Р. Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходных бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–16. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18.
40. Бусаров С. С., Бусаров И. С., Титов Д. С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2019. Т. 3, № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.
41. Бусаров И. С., Бусаров С. С., Юша В. Л. Влияние деформации проточной части эластомерных элементов самодействующих клапанов на характеристики тихоходных длинноходных компрессорных ступеней // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 4. С. 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38.
42. Бусаров С. С., Юша В. Л., Кобыльский Р. Э. Экспериментальная оценка эффективности манжетного уплотнения цилиндропоршневой группы длинноходовой компрессорной ступени // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 3. С. 20–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-20-27.
43. Недовенчаный А. В., Юша В. Л., Бусаров С. С., Громов А. Ю., Бусаров И. С., Титов Д. С. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора // *Компрессорная техника и пневматика*. 2016. № 6. С. 6–10.
44. Недовенчаный А. В., Юша В. Л., Бусаров С. С., Силков М. В. Анализ влияния закона регулирования линейного гидропривода на энергетические и динамические характеристики одноступенчатого компрессорного агрегата // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2019. № 11 (176). С. 26–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35.
45. Юша В. Л., Бусаров С. С. Методика расчёта действительной производительности одноступенчатых длинноходных поршневых компрессоров // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 4. С. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15.
46. Юша В. Л., Бусаров С. С. Определение показателей политропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходных компрессорных ступеней // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22.
47. Берман Я. А., Маньковский О. Н., Марр Ю. Н., Рафалович А. П. Системы охлаждения компрессорных установок. Ленинград: Машиностроение, 1984. 228 с.
48. Кабаков А. Н., Юша В. Л. Рабочие процессы винтовых компрессоров с газожидкостным рабочим телом. Омск: Изд-во ОмПИ, 1988. 80 с.
49. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Кобыльский Р. Э. Экспериментальное определение контактного давления манжетного уплотнения на стенке рабочей камеры // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 7. С. 20–23. DOI: 10.17513/snt.38127.
50. Юша В. Л., Бусаров С. С. Особенности реализации многоступенчатого сжатия в воздушных компрессорных агрегатах на базе тихоходных длинноходных ступеней // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2021. № 7. С. 27–30.

51. Недовенчаный А. В., Бусаров С. С., Бусаров И. С. Снижение массогабаритных параметров тихоходного длинноходового агрегата с линейным гидравлическим приводом за счёт улучшения его энергетических характеристик // Компрессорная техника и пневматика. 2020. Вып. 2. С. 13–16.
52. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Кобыльский Р. Э. Экспериментальное исследование поршневого длинноходового агрегата с электромеханическим приводом // Компрессорная техника и пневматика. 2021. № 2. С. 32–35.
53. Татевосян А. А., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Жуков А. О. Экспериментальная оценка характеристик системы «компрессорная ступень — линейный магнитоэлектрический привод» // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 59–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-59-65.
54. Gouda E. M., Fan J., Benaouicha M. [et al.]. Review on Liquid Piston technology for compressed air energy storage // Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 43 (9). 103111. DOI: 10.1016/j.est.2021.103111.
55. А. с. 573609 СССР, МПК F 04 В 35/02. Компрессор с жидкостным поршнем / Александров А. И. № 2119451/06; опубл. 25.09.77. Бюл. № 35.
56. А. с. 868115 СССР, МПК F 04 В 35/02. Компрессор с жидкостным поршнем / Тютюма В. Д., Антипов В. В., Ждановский А. А. [и др.]. № 2853295/25-06; опубл. 30.09.81. Бюл. № 36.
57. А. с. 1153109 СССР, МПК F 04 В 35/02. Поршневой компрессор с жидкостным поршнем / Хомасуридзе Б. С., Кацитадзе Д. В., Амirezашвили Л. А. № 3672506/25-06; опубл. 30.04.85. Бюл. № 16.
58. Пат. 2770341 Российская Федерация, МПК F 04 В 35/02. Поршневой одноступенчатый компрессор высокого давления / Юша В. Л., Бусаров С. С. № 2019135215; заявл. 01.11.19; опубл. 15.04.22. Бюл. № 11.
59. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Кобыльский Р. Э., Титов Д. С. Ресурс работы тихоходных компрессорных агрегатов и возможности его увеличения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3. № 1. С. 42–49. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49.
60. А. с. 89087 СССР, МПК 27b, 6; 47h, 18. Поршневой компрессор с гидравлическим приводом / Косолапов А. С. № 412970; заявл. 23.02.50 в Гостехнику СССР.
61. А. с. 442314 СССР, МПК F 04 В 35/02. Поршневой компрессор с гидравлическим приводом / Ешуткин Д. Н., Иттер И. Я., Кабаков В. А. [и др.]. № 1760238/24; опубл. 05.09.74. Бюл. № 33.
62. Пат. 2215187 Российская Федерация, МПК F 04 В 35/02. Гидроприводной компрессор / Валов Ю. В., Фёдоров А. С., Михайлов В. В., Тетерин В. Н., Рунов Е. В. № 2002110750/06; заявл. 24.04.02; опубл. 27.10.03.
63. Кошкин Н. Н., Ткачёв А. Г., Бадьялькес И. С. [и др.]. Холодильные машины / под ред. Н. Н. Кошкина. Москва: Пищевая промышленность, 1973. 512 с.
64. Теплофизические основы получения искусственно-го холода: справ. / Сост. Бучко Н. А., Гоголин А. А., Латышев В. П. [и др.]. Москва: Пищевая промышленность, 1980. 232 с.
65. Сакун И. А. Винтовые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1970. 400 с.
66. Dutta A. K., Yanagisawa T., Fukuta M. A Study on Compression Characteristic of Wet Vapor Refrigerant // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 1996. 1112. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/1112> (дата обращения: 14.05.2022).
67. Akhmed H. J., Khalifa A. H., Khalaf D. Z. Performance Investigation of Vapor Compression Cycle with a Variable Speed Compressor and Refrigerant Injection // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 16 (2). P. 63–76.
68. Wang B., Yang M., Dewitte P. [et al.]. Evaluation of methods to decrease the discharge temperature of R32 scroll compressor // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2014. 2371. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2371> (дата обращения: 11.03.2022).
69. Pawale K. T., Sali N. V., Deshpande G. N. Vapor compression refrigeration system with refrigerant injection: a review // Elixir Mech. Eng. 2014. Vol. 72. P. 25410–25414.
70. Lin J., Lian Y., Wu J. Numerical investigation on vapor-liquid two-phase compression in the cylinder of rotary compressors // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 170. 115022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115022.
71. Controlled Injection Cooling (CIC). URL: <http://bitzer.de> (дата обращения: 22.02.2022).
72. Пекарев В. И., Иванова С. Н., Сафонова Н. А. Определение точки вырыска охлаждающей жидкости в винтовой компрессор // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 2. С. 45–48.
73. Wang J., Ding H., Wang B. [et al.]. CFD simulation of a rotary compressor with gas injection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 604. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012084.
74. Wei H., Yu B., Yang O. Theoretical and experimental study on rotary compressor with double vapor injection and its system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012049.
75. Новые возможности низкотемпературного применения холодильных компрессоров. URL: <https://climate.emerson.com/documents/новые-возможности-низкотемпературного-применения-холодильных-компрессоров-ru-ru-4215396.pdf> (дата обращения: 03.06.2022).
76. Буданов В. А., Беркань И. В. Повышение энергоэффективности компрессоров // Казахстан-Холод 2020: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. (4–5 марта 2020 г.). Алматы: Изд-во АТУ, 2020. С. 49–54.
77. Пат. 2092748 Российская Федерация, МПК F 25 В 1/00. Способ получения холода и компрессорная холодильная машина / Матвеев С. Б. № 93032916/06; заявл. 24.06.93; опубл. 10.10.97.
78. Пат. 2143651 Российская Федерация, МПК F 25 В 29/00. Способ и устройство для трансформации тепловой энергии / Самхан И. И. № 97111245/06; заявл. 01.07.97; опубл. 27.12.99.
79. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The Efficiency Theoretical Analysis of the Ammonia Refrigeration Cycle Based on the Compression in the Wet Vapor Region // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. 030078. DOI: 10.1063/5.0029565.
80. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределенности на математическое моделирование процесса сжатия аммиака в области влажного пара // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 30–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-30-38.
81. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределенности на математическое моделирование процесса обратного расширения аммиака в тихоходной поршневой компрессорной ступени. Часть 1 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 44–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-44-54.
82. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределенности на математическое моделирование процесса обратного расширения аммиака в тихоходной поршневой компрессорной ступени. Часть 2 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 50–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-50-58.
83. Fang X., Zhuang F., Chen C. [et al.]. Saturated flow boiling heat transfer: review and assessment of prediction methods //

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 1503-9666
ORCID: 0000-0001-9858-7687
AuthorID (SCOPUS): 6505861937

Для цитирования

Юша В. Л. Научно-технологические предпосылки совершенствования и промышленного освоения малорасходных компрессорных агрегатов на базе длинноходовых поршневых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С.24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39.

Статья поступила в редакцию 17.06.2022 г.

© В. Л. Юша

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PREREQUISITES FOR IMPROVEMENT AND INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF LOW-FLOW COMPRESSOR UNITS BASED ON LONG-STROKE PISTON STAGES

V. L. Yusha

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

An overview analysis of research and development in the field of air and refrigeration low-flow compressors based on low-speed long-stroke piston stages is presented and an assessment of scientific and technological prerequisites for improving their energy efficiency and competitiveness is carried out. Two promising directions are considered in which such compressors can find effective application: increasing the gas pressure from atmospheric pressure to medium and high pressures; implementation of combined processes of compression and condensation of refrigerants in the working chamber of the stage. A number of scientific problems have been proposed and substantiated, the solution of which will make it possible to create competitive compressor units applicable in refrigeration and cryogenic engineering, thermostating and life support systems, medicine and pharmaceuticals, petrochemical and oil and gas industries, small-scale energy, transport.

Keywords: low-flow compressor, piston low-speed long-stroke stage, work processes, medium and high discharge pressure, «quasi-isothermal» compression, air, refrigerant, refrigeration cycle, compression in the area of wet steam.

References

1. Ostertag P. Kompresory i vozdukhoduvki: per. s nem. V 2 t. T. 1 [Compressors and blowers: trans. from Germ. In 2 vols. Vol. 1]. 2nd ed. Moscow-Leningrad: GONTI Publ., 1931. 208 p. (In Russ.).
2. Aleksandrov V. I., Badyl'kes I. S., Vasilenko I. F. [et al.]. Mashinostroyeniye. Entsiklopedicheskiy spravochnik. V 15 t. [Mechanical Engineering. Encyclopedic handbook. In 15 vols.] / ed. by Chudakova E. A., Martensa A. K. Moscow: MASHGIZ Publ., 1948. Vol. 12. 330 p. (In Russ.).
3. Sherstyuk A. N. Kompresory [Compressors]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1959. 191 p. (In Russ.).
4. Zakharenko S. E., Anisimov S. A., Dmitrevskiy V. A. [et al.]. Porshnevyye kompresory [Piston compressors] / ed. by S. E. Zakharenko. Moscow-Leningrad: Mashgiz Publ., 1961. 455 p. (In Russ.).
5. Frenkel' M. I. Porshnevyye kompresory. Teoriya, konstruktii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors. Theory, constructions and basics of design]. 3rd ed. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1969. 744 p. (In Russ.).
6. Vidyakin Yu. A., Dobroklonskiy E. B., Kondrat'yeva T. F. Oppozitnyye kompresory [Opposed compressors]. 2nd ed. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1979. 279 p. (In Russ.).
7. Mikhaylov A. K., Voroshilov V. P. Kompresornyye mashiny [Compressor machines]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 288 p. (In Russ.).
8. AO «Kompessor» [JSC «Compressor»]. URL: <http://www.compressor.spb.ru/contact.html> (accessed: 18.05.2022). (In Russ.).
9. Spravochnik khimika 21 [Chemist's Handbook 21]. URL: <https://www.chem21.info/> (accessed: 03.04.2022). (In Russ.).
10. 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.).
11. We engineer tomorrow to build a better future. URL: <https://www.danfoss.com> (accessed: 02.06.2022). (In Engl.).
12. Home of industrial ideas. URL: <https://www.atlascopco.com> (accessed: 12.04.2022). (In Engl.).
13. Kompresornyye sistemy [Compressor systems]. URL: <https://www.ingersollrand.com> (accessed: 18.02.2022). (In Russ.).
14. Engineering for a better world. URL: <https://www.gea.com> (accessed: 11.05.2022). (In Engl.).
15. Proizvodstvo kompressorov Hofer [Production of Hofer compressors]. URL: <https://www.andreas-hofer.ru> (accessed: 18.02.2022). (In Russ.).
16. Kompresornoye oborudovaniye [Compressor equipment]. URL: <https://www.compressor.net.ru> (accessed: 11.03.2022). (In Russ.).
17. Climate technologies worldwide. URL: <https://www.climate.emerson.com> (accessed: 11.05.2022). (In Engl.).
18. Chelyabinskiy kompresornyy zavod [Chelyabinsk Compressor Plant]. URL: <https://www.chkz.ru> (accessed: 10.06.2022). (In Russ.).
19. Leading compressor technology and system. URL: <https://www.burckhardtcompression.com/> (accessed: 22.04.2022). (In Engl.).
20. Global MYCOM. URL: <https://www.mayekawa.com> (accessed: 22.04.2022). (In Engl.).
21. Promyshlennyye kompresory Mattei [Mattei Industrial Compressors]. URL: <http://www.mattei-it.ru/kompresor/> (accessed: 26.04.2022). (In Russ.).
22. Development team since 1999. URL: <https://www.ctkeuro.ru> (accessed: 19.05.2022). (In Engl.).
23. Plastinin P. I. Porshnevyye kompresory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vol. Vol. 1. Theory and calculation]. Moscow: KolosS Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).
24. Plastinin P. I. Porshnevyye kompresory. V 2 t. T. 2. Osnovy proyektirovaniya. Konstruktii [Piston compressors. In 2 vol. Vol. 2. Basics of design. Constructions]. Moscow: KolosS Publ., 2008. 711 p. (In Russ.).
25. Shi Jian. Compressor with liquid piston. CN patent 102953955 A; published June 6th, 2013. (In Engl.).
26. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyj A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of

highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 113. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.proeng. 2015.07.333. (In Engl.).

27. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, Issue 3. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5. (In Engl.).

28. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheyndlin A. E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983. 407 p. (In Russ.).

29. Bogdanov S. N., Buchko N. A., Guygo E. I. *Teoreticheskiye osnovy khladotekhniki. Teplomassoobmen* [Theoretical foundations of cold technology. Heat and mass transfer]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 320 p. (In Russ.).

30. Bosnjakovic F., Knoche K. F. *Technische Thermodynamik: Teil I*. Darmstadt; Steinkopff, 1998. 543 S. (In Germ.).

31. Bashta T. M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [Mechanical hydraulics]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1971. 672 p. (In Russ.).

32. Vickers — gidravlicheskiye oborudovaniye dlya promyshlennogo i mobil'nogo primeneniya [Vickers — hydraulic equipment for industrial and mobile applications]. URL: <https://www.vickers.ru> (accessed: 02.06.2022). (In Russ.).

33. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2. (In Engl.).

34. Yusha V. L., Busarov S. S. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and high pressures based on unified low-speed long-stroke stages] // *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. Materials Science. Power Engineering*. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408. (In Russ.).

35. Yusha V. L., Busarov S. S., Chernov G. I. *Teoreticheskaya otsenka vliyaniya sistem okhlazhdeniya i rekuperatsii na energoeffektivnost' kompressornykh agregatov na baze porshnevnykh dlinnokhodovykh stupeney* [Theoretical Assessment of the Impact of Cooling and Recovery Systems on Energy Efficiency of Compressor Units Based on Long Stroke Piston Stages] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020. No. 2. P. 35–44. (In Russ.).

36. Yusha V. L., Busarov S. S., Filkin N. Yu., Fedorova M. A., Denisenko V. V., Goncharenko A. A., Shipov V. B., Bessonov O. G. Implementing the principles of operating processes schematization and of performance loss distribution when desiging long-stroke reciprocating compressor stages // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012016. (In Engl.).

37. Gromov A. Yu. *Razrabotka porshnevnykh stupeney s lineynym privodom dlya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov i issledovaniye ikh rabochikh protsessov* [Development of piston stages with linear drive for low-flow compressor units and study of their working processes]. Omsk, 2017. 213 p. (In Russ.).

38. Nedovenchanyy A. V. *Povysheniye energeticheskoy i dinamicheskoy effektivnosti porshneвого maloraskhodnogo odnostupenchatogo kompressornogo agregata s lineynym privodom* [Improving the energy and dynamic efficiency of a piston low-flow single-stage compressor unit with a linear drive]. Omsk, 2020. 232 p. (In Russ.).

39. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Goshlya R. Yu. *Ekspperimental'noye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsyavaniya* [Experimental study of

working processes of low-speed longstroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18. (In Russ.).

40. Busarov S. S., Busarov I. S., Titov D. S. *Ekspperimental'noye opredeleniye uslovykh zazorov tsilindroporshnevnykh uplotneniy kompressornykh agregatov* [Experimental determination of conditional clearances for cylinder piston seals of compressor units] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56. (In Russ.).

41. Busarov I. S., Busarov S. S., Yusha V. L. *Vliyaniye deformatsii protochnoy chasti elastomernykh elementov samodeystvuyushchikh klapanov na kharakteristiki tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney* [The effect of deformation of flow part of elastomeric elements of self-acting valves on characteristics of low-speed long-stroke compressor stages] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38. (In Russ.).

42. Busarov S. S., Yusha V. L., Kobylskiy R. E. *Ekspperimental'naya otsenka effektivnosti manzhetnogo uplotneniya tsilindroporshchnevoy gruppy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni* [Experimental evaluation of effectiveness of lip seal of cylinder-piston group of long-stroke compressor stage] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 3. P. 20–27. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-20-27. (In Russ.).

43. Nedovenchanyy A. V., Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu., Busarov I. S., Titov D. S. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov teploobmena v rabochey kamere tikhokhodnoy stupeni porshneвого kompressora* [Mathematical modeling of heat transfer processes in the working process of the low-speed stage of a reciprocating compressor] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Engineering and Pneumatics*. 2017. No. 3. P. 14–18. (In Russ.).

44. Nedovenchanyy A. V., Yusha V. L., Busarov S. S., Silkov M. V. *Analiz vliyaniya zakona regulirovaniya lineynogo gidroprivoda na energeticheskoye i dinamicheskoye kharakteristiki odnostupenchatogo kompressornogo agregata* [An analysis of the influence of the linear hydraulic drive regulation law on the energy and dynamic characteristics of a single-stage compressor unit] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2019. No. 11 (176). P. 26–35. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-11-26-35. (In Russ.).

45. Yusha V. L., Busarov S. S. *Metodika rascheta deystvitel'noy proizvoditel'nosti odnostupenchatykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressorov* [Method for calculating actual capacity of single-stage long-stroke reciprocating compressors] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15. (In Russ.).

46. Yusha V. L., Busarov S. S. *Opredeleniye pokazateley politropy skhematizirovannykh rabochikh protsessov vozdukhovykh porshnevnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney* [Determination of polytropic indicators of schematized working processes of air piston slowmoving long-stroke compressor stages] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22. (In Russ.).

47. Berman Ya. A., Mankovskiy O. N., Marr Yu. N., Rafalovich A. P. *Sistemy okhlazhdeniya kompressornykh ustanovok* [Cooling

systems for compressor units]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1984. 228 p. (In Russ.).

48. Kabakov A. N., Yusha V. L. Rabochiye protsessy vintovykh kompressorov s gazozhidkostnym rabochim telom [Working processes of screw compressors with gas-liquid working body]. Omsk, 1988. 80 p. (In Russ.).

49. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Kobyl'skiy R. E. Eksperimental'noye opredeleniye kontaktnogo davleniya manzhetnogo uplotneniya na stenki rabochey kamery [Experimental determination of the contact pressure of the lip seal on the walls of the working chamber] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Modern High Technologies*. 2020. No. 7. P. 20–23. DOI: 10.17513/snt.38127. (In Russ.).

50. Yusha V. L., Busarov S. S. Osobennosti realizatsii mnogostupenchatogo szhatiya v vozduzhnykh kompressornykh agregatakh na baze tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Features of the implementation of multistage compression in air compressor units based on low-speed long-stroke stages] // *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. No. 7. P. 27–30. (In Russ.).

51. Nedovenchany A. V., Busarov S. S., Busarov I. S. Snizheniye massogabaritnykh parametrov tikhokhodnogo dlinnokhodovogo agregata s lineynym gidravlicheskim privodom za schet uluchsheniya ego energeticheskikh kharakteristik [Reducing the weight and size parameters of a low-speed long-stroke unit with a linear hydraulic drive by improving its energy characteristics] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2020. Issue 2. P. 13–16. (In Russ.).

52. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Kobyl'skiy R. E. Eksperimental'noye issledovaniye porshnevoogo dlinnokhodovogo agregata s elektromekhanicheskim privodom [Experimental study of a piston long-stroke unit with an electromechanical drive] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2021. Issue 2. P. 32–35. (In Russ.).

53. Tatevosyan A. A., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Zhukov A. O. Eksperimental'naya otsenka kharakteristik sistemy «kompressornaya stupen' – lineynyy magnitoelektricheskiy privod» [Experimental evaluation of system characteristics «compressor stage–linear magnetoelectric drive»] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 59–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-59-65. (In Russ.).

54. Gouda E. M., Fan J., Benaouicha M. [et al.]. Review on Liquid Piston technology for compressed air energy storage // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 43 (9). 103111. DOI: 10.1016/j.est.2021.103111. (In Engl.).

55. Patent 573609 USSR, IPC F 04 B 35/02. Kompressor s zhidkostnym porshnem [Liquid Piston Compressor] / Aleksandrov A. I. No. 2119451/06. (In Russ.).

56. Patent 868115 USSR, IPC F 04 B 35/02. Kompressor s zhidkostnym porshnem [Liquid Piston Compressor] / Tyutyuma V. D., Antipov V. V., Zhdanovskiy A. A. [et al.]. No. 2853295/25-06. (In Russ.).

57. Patent 1153109 USSR, IPC F 04 B 35/02. Porshnevoyy kompressor s zhidkostnym porshnem [Piston compressor with liquid piston] / Khomasuridze B. S., Katsitadze D. V., Amirezashvili L. A. No. 3672506/25-06. (In Russ.).

58. Patent 2770341 Russian Federation, IPC F 04 B 35/02. Porshnevoyy odnostupenchatyy kompressor vysokogo davleniya [Piston single-stage compressor of high pressure] / Yusha V. L., Busarov S. S. No. 2019135215. (In Russ.).

59. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Kobyl'skiy R. E., Titov D. S. Resurs raboty tikhokhodnykh kompressornykh agregatov i vozmozhnosti ego uvelicheniya [Service life of work of low-speed long-running stages of compressor units and possible ways of its increase] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye*

mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 42–49. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49. (In Russ.).

60. Patent 89087 USSR, IPC 27b, 6; 47h, 18. Porshnevoyy kompressor s gidravlicheskim privodom [Hydraulic driven piston compressor] / Kosolapov A. S. No. 412970. (In Russ.).

61. Patent 442314 USSR, IPC F 04 B 35/02. Porshnevoyy kompressor s gidravlicheskim privodom [Hydraulic driven piston compressor] / Eshutkin D. N., Itter I. Ya., Kabakov V. A. [et al.]. No. 1760238/24. (In Russ.).

62. Patent 2215187 Russian Federation, IPC F 04 B 35/02. Gidroprivodnoyy kompressor [Hydraulic Compressor] / Valov Yu. V., Fedorov A. S., Mikhaylov V. V., Teterin V. N., Runov E. V. No. 2002110750/06. (In Russ.).

63. Koshkin N. N., Tkachev A. G., Badyl'kes I. S. [et al.]. Kholodil'nyye mashiny [Refrigeration machines] / ed. by N. N. Koshkina. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1973. 512 p. (In Russ.).

64. Teplofizicheskiye osnovy polucheniya iskusstvennogo kholoda: sprav. [Thermophysical bases for obtaining artificial cold: handbook] / Comp. Buchko N. A., Gogolin A. A., Lатышев V. P. [et al.]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 232 p. (In Russ.).

65. Sakun I. A. Vintovyye kompressory [Screw compressors]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1970. 400 p. (In Russ.).

66. Dutta A. K., Yanagisawa T., Fukuta M. A Study on Compression Characteristic of Wet Vapor Refrigerant // *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. 1996. 1112. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/1112> (accessed: 14.05.2022). (In Engl.).

67. Akhmed H. J., Khalifa A. H., Khalaf D. Z. Performance Investigation of Vapor Compression Cycle with a Variable Speed Compressor and Refrigerant Injection // *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 16 (2). P. 63–76. (In Engl.).

68. Wang B., Yang M., Dewitte P. [et al.]. Evaluation of methods to decrease the discharge temperature of R32 scroll compressor // *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. 2014. 2371. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2371> (accessed: 11.03.2022). (In Engl.).

69. Pawale K. T., Sali N. V., Deshpande G. N. Vapor compression refrigeration system with refrigerant injection: a review // *Elixir Mech. Eng*. 2014. Vol. 72. P. 25410–25414. (In Engl.).

70. Lin J., Lian Y., Wu J. Numerical investigation on vapor-liquid two-phase compression in the cylinder of rotary compressors // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 170. 115022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115022. (In Engl.).

71. Controlled Injection Cooling (CIC). URL: <http://bitzer.de> (accessed: 22.02.2022). (In Engl.).

72. Pekarev V. I., Ivanova S. N., Safonova N. A. Opredeleniye tochki vpryska okhlazhdayushchey zhidkosti v vintovoy kompressor [Definition of a point of injection of cooling liquid in the screw compressor] // *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye». Scientific Journal NRU ITMO. Series «Refrigeration and Air Conditioning»*. 2015. No. 2. P. 45–48. (In Russ.).

73. Wang J., Ding H., Wang B. [et al.]. CFD simulation of a rotary compressor with gas injection // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 604. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/604/1/012084. (In Engl.).

74. Wei H., Yu B., Yang O. Theoretical and experimental study on rotary compressor with double vapor injection and its system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012049. (In Engl.).

75. Novyye vozmozhnosti nizkotemperaturnogo primeneniya kholodil'nykh kompressorov [New Possibilities for Low Temperature Applications of Refrigeration Compressors]. URL: <https://climate.emerson.com/documents/новые-возможности-низкотемпературного-применения-холодильных->

компрессоров-ru-ru-4215396.pdf (accessed: 03.06.2022). (In Russ.).

76. Budanov V. A., Berkan' I. V. Povysheniye energoeffektivnosti kompressorov [Improving the energy efficiency of compressors] // Kazakhstan-Kholod 2020. *Kazakhstan-Kholod 2020*. Almaty, 2020. P. 49–54. (In Russ.).

77. Patent 2092748 Russian Federation, IPC F 25 B 1/00. Sposob polucheniya kholoda i kompressornaya kholodil'naya mashina [The method of obtaining cold and compressor refrigeration machine] / Matveyev S. B. No. 93032916/06. (In Russ.).

78. Patent 2143651 Russian Federation, IPC F 25 B 29/00. Sposob i ustroystvo dlya transformatsii teplovoy energii [Method and device for the transformation of thermal energy] / Samkhan I. I. No. 97111245/06. (In Russ.).

79. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The Efficiency Theoretical Analysis of the Ammonia Refrigeration Cycle Based on the Compression in the Wet Vapor Region // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. 030078. DOI: 10.1063/5.0029565. (In Engl.).

80. Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. Analiz vliyaniya faktorov neopredelennosti na matematicheskoye modelirovaniye protsessa szhatiya ammiaka v oblasti vlazhnogo para [The analysis of uncertainty factors influence on mathematical modeling of ammonia compression in wet vapor area] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 30–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-30-38. (In Russ.).

81. Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. Analiz vliyaniya faktorov neopredelennosti na matematicheskoye modelirovaniye protsessa obratnogo rasshireniya ammiaka v tikhokhodnoy porshnevoy kompressornoy stupeni. Chast' 1 [The analysis of influence of uncertainty factors on mathematical modeling of process of reverse expansion of ammonia in low-speed reciprocating compressor stage. Part 1] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-*

Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 44–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-44-54. (In Russ.).

82. Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. Analiz vliyaniya faktorov neopredelennosti na matematicheskoye modelirovaniye protsessa obratnogo rasshireniya ammiaka v tikhokhodnoy porshnevoy kompressornoy stupeni. Chast' 2 [The analysis of influence of uncertainty factors on mathematical modeling of process of reverse expansion of ammonia in low-speed reciprocating compressor stage. Part 2] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 50–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-50-58. (In Russ.).

83. Fang X., Zhuang F., Chen C. [et al.]. Saturated flow boiling heat transfer: review and assessment of prediction methods // Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55 (1). P. 197–222. DOI: 10.1007/s00231-018-2432-1. (In Engl.).

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: yusha@omgtu.ru

For citations

Yusha V. L. Scientific and technological prerequisites for improvement and industrial development of low-flow compressor units based on long-stroke piston stages // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39.

Received June 11, 2022.

© V. L. Yusha