

О ВЗАИМОСВЯЗИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ КРУПНЫХ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ С ТЕХНИЧЕСКИМ ОБЛИКОМ ПАРКА КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. Л. Юша, М. А. Сутягинский¹, А. Ю. Громов², П. В. Ушаков², Ю. А. Потапов¹

¹АО «Группа компаний «Титан»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 22

²АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника»,
Россия, 644105, г. Омск, ул. 22 Партсъезда, 97, корп. 1

Рассмотрены вопросы, связанные с возможными проблемами реализации программ цифровизации крупных предприятий по переработке природного углеводородного и минерального сырья, обусловленными несоответствием технического уровня существующего парка компрессорного оборудования этих предприятий как требованиям современного производства, так и передовым достижениям в области компрессоростроения. Отмечено, что несоответствие между моделируемыми (виртуальными) и физическими технологическими объектами приводит к завышению расходов на создание и поддержку IT-продуктов, а также к снижению их эффективности. Предложены пути совершенствования элементной базы компрессорного оборудования. Выполнен теоретический анализ эффективности функционирования альтернативной конструкции ротационно-пластинчатого компрессора с подачей воды в его проточную часть, показывающий принципиальную возможность замены парка существующих поршневых технологических компрессоров на более совершенные конструкции, производство которых может быть полностью основано на отечественных технологиях и локализовано в РФ в интересах профильных отраслей перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: цифровизация, надежность, эксплуатационные характеристики, поршневые компрессоры, ротационно-пластинчатые компрессоры с впрыском воды, математическая модель.

Анализ проблем создания виртуальных аналогов технологического оборудования

Цифровые платформы как мотивационная база для развития современного технологического оборудования

Опережающее развитие IT-технологий и на их основе — создание цифровых платформ различных уровней, от локальных и корпоративных до государственных и межотраслевых — актуальный тренд индустриального развития РФ [1–6]. В то же время применительно к современным тенденциям в области глобальной цифровизации существует субъективное мнение, что формальный подход к реализации такого проекта может привести к невосполнимым потерям как в масштабах государства, так и в масштабах нашей цивилизации [7–8]. Применительно к промышленному производству, как основе развития современного общества и как основному источнику техногенных угроз его существованию, поспешная реализация предлагаемых программ цифровизации может привести к потере полноценной взаимосвязи между виртуальными технологическими объектами и их реальными физическими прототипами. Это может быть обусловлено объективным наличием неформализуемых или трудно формализуемых факторов, присутствующих большинству сложных технологических

объектов, например, ограниченными возможностями по глубине детализации виртуального объекта; непрогнозируемым изменением эксплуатационных параметров и характеристик реального объекта и др. Вполне очевидно, что необходимо стремиться к минимизации влияния таких факторов. Особенно актуально это для продукции отечественного производства. При этом возможны два основных подхода.

Первый подход связан с ориентацией на существующий парк технологического оборудования, с увеличением до непредсказуемого уровня сложности виртуальных объектов и систем управления ими, имея в виду необходимость учёта не только неоправданно высокой номенклатуры технологических объектов, их систем и узлов, но и вероятности значительного изменения эксплуатационных характеристик и параметров каждого из них; аварийного выхода из строя как локальных компонентов, так и систем; проблемы унификации, взаимозаменяемости и обеспеченности запасными частями и пр. Можно предположить, что такой IT-продукт потребует не только дополнительных систем защиты, но и постоянного «ручного» вмешательства: корректировки, доработки и контроля. В результате существенно возрастает трудоёмкость и стоимость создания и эксплуатации IT-продукта и цифровых платформ на его основе; неизбежно снижается его надёжность и, соответственно, безопасность реаль-

ного производства; повышается себестоимость товарной продукции (или, по меньшей мере, замедляется её снижение).

Другой подход может быть основан на плановой замене морально и физически устаревшего технологического оборудования на новую технику: более простую, надёжную, удобную в эксплуатации, адаптированную к цифровым технологиям. Применительно к задачам цифровизации такая концепция может не только повысить эффективность их реализации, но и перейти к такому принципу создания новой техники, при котором одними из требований технического задания будут требования, связанные с возможностью наиболее эффективной адаптации вновь создаваемого технического объекта к той или иной цифровой платформе. Другими словами, исходя из своих технико-экономических потребностей потребитель может более эффективно формировать парк требуемого технологического оборудования, участвуя в формулировании технических требований к перспективной технике, в том числе исходя из критериев соответствия программам цифровизации.

О соответствии парка существующих технологических компрессоров требованиям современного производства по переработке природного углеводородного и минерального сырья

В ряде машиностроительных отраслей такой подход успешно реализуется, например, в двигателестроении. Однако применительно к технологическому оборудованию малой и средней мощности масштаб задач в области цифровизации тех или иных производств существенно опережает технический уровень технологического оборудования этих производств. Основными типами технологического оборудования химических и нефтеперерабатывающих предприятий являются компрессоры, насосы, печи, теплообменники, реакторы и т.п. В качестве примера рассмотрим одни из наиболее сложных технических объектов — поршневые технологические компрессоры малой производительности с перепадом давления газа в ступени до 1,0...2,0 МПа, широко применяемые для сжатия водорода, водородсодержащего газа, азота и воздуха.

Прежде всего обращает на себя внимание широкая номенклатура компрессоров этой группы. На одном и том же предприятии можно одновременно увидеть поршневые компрессоры с близкими характеристиками таких фирм, как NEWMAN&ESSER, Worthington, LMF, Burckhardt, Howden SKD Compressors и др., а также Пензкомпрессормаш, «Борец», Сумское машиностроительное НПО имени М. В. Фрунзе [9–18].

При этом конструкция каждого из таких компрессоров может включать в себя до 500 наименований деталей и узлов, и это без учёта силового приводного агрегата, систем мониторинга, дополнительных систем (газовых коммуникаций, смазки, водяного и воздушного охлаждения). В самой простой конструкции двухрядного поршневого компрессора имеется не менее 10 узлов трения (подшипники, уплотнения), требующих постоянного мониторинга, обслуживания и ремонта. Не менее ответственными, тяжело нагруженными и проблемными узлами являются самодействующие клапаны. Износ этих узлов приводит к снижению КПД до 20 %, недопустимому повышению температуры нагнетания и увеличению утечек рабочего газа. В связи с этим межремонтные сроки для большинства техноло-

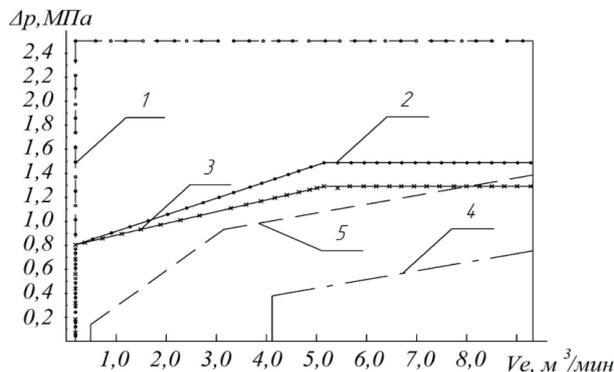


Рис. 1. Области применения основных типов компрессоров: 1 — поршневые компрессоры; 2 — винтовые компрессоры с подачей жидкости в рабочую камеру; 3 — ротационно-пластинчатые компрессоры с подачей жидкости в рабочую камеру; 4 — центробежные компрессоры; 5 — перспективные центробежные компрессоры (прогноз)

гических поршневых компрессоров составляют не более 8000 часов; на практике эти величины могут быть значительно меньше [14, 16, 18].

Анализ альтернативных технических решений

Не претендуя в рамках данной статьи на какие-либо формулировки в конечной инстанции, необходимо отметить, что очевидными требованиями, предъявляемыми вновь разрабатываемыми цифровыми платформами к компрессорной технике, могут стать: максимальное снижение номенклатуры и предельная унификация, повышенная надёжность технических объектов, стабильность их характеристик в течение эксплуатационного периода, продолжительный межремонтный период.

В настоящее время основные усилия разработчиков и производителей поршневых технологических компрессоров рассматриваемого типа связаны с модернизацией узлов трения и газораспределения, что не решает принципиальных проблем, характерных для поршневых компрессоров, а зачастую приводит к дальнейшему удорожанию компрессоров в целом и их комплектующих в отдельности. При этом современный уровень техники позволяет ставить задачи по созданию альтернативных высококонкурентных компрессоров для рассматриваемого диапазона режимных параметров. На рис. 1 представлена диаграмма, полученная по результатам анализа многочисленных открытых источников информации и отражающая применимость различных типов компрессоров в диапазоне рассматриваемых рабочих параметров. На текущий момент доминирующее положение на рынке занимают поршневые компрессоры. Однако уже сейчас можно прогнозировать вполне реальную конкуренцию со стороны других типов компрессоров.

Так, например, анализ тенденций развития и постоянного повышения технического уровня турбокомпрессоров показывает, что ввиду своих известных преимуществ они постепенно расширяют диапазон режимных параметров в сторону снижения производительности, вытесняя с рынка другие типы компрессоров, в том числе и поршневые [19–22]. С учётом последних достижений в обла-

сти материаловедения, разработки подшипниковых узлов, конструирования проточной части ступеней с высокой степенью вероятности можно предполагать, что в обозримом будущем будут созданы центробежные компрессоры, обеспечивающие технологические режимы с производительностью от 1 до 10 м³/мин по условиям всасывания при перепаде давлений между нагнетанием и всасыванием от 0,4...0,6 МПа в одной ступени до 1,0...4,0 МПа при многоступенчатом сжатии.

С учётом того, что лучшие зарубежные образцы роторных компрессоров (например, винтовых с подачей масла или воды в проточную часть) уже сейчас обеспечивают режимные параметры, близкие к требуемым, более целесообразным представляется создание на базе отечественных технологий и в приемлемые сроки альтернативных конкурентоспособных конструкций роторно-пластинчатых компрессоров объёмного действия, также обладающих неоспоримыми преимуществами по сравнению с поршневыми компрессорами [23]. В связи с этим стоит отметить уже имеющийся в РФ положительный опыт реконструкции производств, когда в критических секторах экономики на государственном уровне в кратчайшие сроки были решены проблемы технологической безопасности в области создания собственного производства газовых турбин средней и большой мощности [24].

Цифровые платформы как дополнение к рыночному механизму развития компрессорной техники

Текущее состояние машиностроительных предприятий, производящих компрессорное оборудование малой мощности, не позволяет взять на себя разработку и организацию серийного производства перспективной техники. Маловероятно, чтобы государство смогло уделить должное внимание этой проблеме. Очевидной становится необходимость инициативы и участия наиболее крупных потребителей такого оборудования в формировании и реализации целевых программ по обновлению своего технологического, в том числе компрессорного оборудования. Упомянутые выше программы по созданию цифровых платформ могли бы стать эффективным инструментом для реализации требований потенциального потребителя к формированию технического облика перспективных компрессорных систем. При этом объём целевого финансирования инновационных разработок в рассматриваемой области компрессоростроения составит незначительную часть того объёма, который планируется на создание и реализацию цифровых технологических платформ [1–6].

Оценка перспективы создания альтернативных технологических компрессоров

В настоящей статье выполнена оценка возможности и целесообразности разработки и применения технологических ротационно-пластинчатых компрессоров в качестве одного из альтернативных вариантов замены существующих поршневых технологических компрессоров с указанным выше диапазоном паспортных режимных параметров.

Объект исследования

Как показал предварительный анализ, в ближайшей перспективе ротационно-пластинчатые компрессоры (РПК) могут стать одним из наиболее предпочтительных типов компрессорного оборудо-

вания малой мощности, обеспечивая технологическую безопасность и импортнезависимость РФ в целом ряде критически важных отраслей [23]. Для этого должны быть преодолены недоработки их конструкции, которые в настоящее время приводят к повышенным удельным энергозатратам и малому ресурсу.

Как показано в [23, 25], одними из основных критериев эффективности конструкций РПК являются их КПД, коэффициент подачи, мощность трения, удельный вес, ресурс, величины которых существенно зависят от быстроходности машин. Причем увеличение быстроходности положительно отражается на КПД, коэффициенте подачи и удельном весе, но негативно — на мощности трения и ресурсе. В РПК, как и в других типах роторных компрессоров, имеет место целая сеть зазоров в рабочей камере, определяющая наличие перетечек газа. Снижение интенсивности перетечек обеспечивается в том числе снижением времени процессов течения газа через зазоры, то есть увеличением быстроходности компрессора. Так, для обеспечения приемлемых КПД и коэффициента подачи для маслозаполненных винтовых компрессоров и РПК рекомендуемый диапазон окружных скоростей роторов составляет 30...50 м/с; при впрыске воды эта величина может составлять около 50...100 м/с в зависимости от количества впрыскиваемой жидкости и свойств рабочего газа; для роторных компрессоров «сухого» типа — 80...120 м/с [25–28].

Однако при таких скоростях величина мощности сухого трения пластин о зеркало цилиндра становится недопустимой; подача масла обеспечивает смазку в контакте пластина-цилиндр, однако повышенные затраты мощности на перемещение вязкой жидкости приводят к тому, что потери мощности в обоих этих случаях становятся соизмеримы; наибольший эффект обеспечивает впрыск воды, при котором суммарные потери мощности на трение на порядок меньше [29]. Очевидно, что при этом снижается и износ пластин.

С учётом изложенного выше в качестве объекта исследования рассмотрим воздушный РПК с подачей воды в рабочую камеру при окружных скоростях ротора в диапазоне 50...100 м/с, давлении всасывания 0,1 МПа, давлении нагнетания 0,4...0,8 МПа. При прямом соединении вала РПК с валом электродвигателя при $n_{об} = 3000$ об/мин диаметр цилиндра РПК необходим в диапазоне 0,3...0,8 м. Снижение механического трения до приемлемых величин при этом может быть дополнительно обеспечено применением ряда известных технических решений [23]; этот фактор далее в статье не рассматривается.

Математическая модель

Для теоретической оценки эффективности рабочего процесса воздушного РПК с подачей воды в рабочую камеру в рассматриваемом диапазоне конструктивных и режимных параметров применим математическую модель рабочего процесса компрессора объёмного действия со впрыском жидкости, подробно описанную в [25]. Применительно к РПК в качестве контрольного объёма рассмотрим рабочую ячейку переменного объёма, сформированную поверхностями корпуса, ротора и двух соседних пластин, которая заполнена гетерогенной смесью воздух–вода; внешний массообмен осуществляется через окна газораспределения и зазоры. Приняты следующие упрощающие допущения:

газовая среда непрерывна и подчиняется законам идеального газа; давление рабочего тела в полостях всасывания и нагнетания имеет постоянное значение; капельная жидкость представляет собой систему взвешенных в потоке капель сферической формы одинакового диаметра; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным; процессы межфазного массообмена в рабочих полостях квазистационарны; нагрев пленки жидкости происходит с постоянной температурой на поверхности и внутри слоя жидкости; на движение капель не влияет гидродинамическое взаимодействие между ними; воздействие на каплю силы Магнуса, гидромеханических, диффузионных и реактивных сил пренебрежимо мало; при взаимодействии с поверхностями корпуса жидкость осаждается в виде пленки, равномерно распределенной по поверхности; срыв пленки с поверхности рабочей камеры и коагуляция капель в газовом потоке отсутствуют; при дроблении частиц жидкости вращающимися поверхностями роторов размер вторичных частиц полностью определяется величиной скорости столкновения жидкости и ротора.

Система основных расчётных уравнений включает в себя первый закон термодинамики для тела переменной массы с учётом внешнего и межфазного массообмена, законы сохранения массы, Джоуля, Ньютона–Рихмана, Фурье, уравнения состояния, смешения, Фресслинга, Стокса, Сен-Венана–Ванцеля, Мещерского, эмпирические соотношения для определения коэффициентов теплоотдачи, расхода газа и других, и упрощённо может быть представлена в следующем виде [25]:

$$dU = dQ - dL + i_{np} dM_{np} + i_o dM_o + i_{фnp} dM_{фnp} - i_{фо} dM_{фо}; \quad (1)$$

$$dQ = [\alpha_k(T_{новк} - T)F_k N_k + \alpha_{на}(T_{на} - T)F_{на} + \alpha_{ла}(T_{ла} - T)F_{ла}]d\tau; \quad (2)$$

$$U_{n+1} = U_n + dU; \quad (3)$$

$$M_{n+1} = M_n + dM_{np} - dM_o + dM_{фnp} - dM_{фо}; \quad (4)$$

$$T = (U - dM_{фr_0}) / (MC_V); \quad (5)$$

$$P = MRT/V; \quad (6)$$

$$M_{жп+1} = M_{жп} - dM_{фnp} + dM_{фо} - dM_{жо} + dM_{жпр}. \quad (7)$$

Представленная методика расчёта рабочего процесса РПК с подачей воды в его проточную часть позволяет выполнить теоретическую оценку его основных интегральных характеристик — коэффициента подачи, индикаторного КПД, температуры нагнетания. С учётом того, что данная методика была верифицирована лишь по отношению к винтовому компрессору (ВК) со впрыском воды [25], а также с учётом полного соответствия физических процессов в рабочих камерах ВК и РПК, можно рассматривать приведённые ниже результаты расчётов как достоверные с точки зрения прогнозных оценок эффективности компрессоров такого типа.

Результаты расчёта и их анализ

Основные результаты расчётов РПК с подачей воды в рабочую камеру представлены на рис. 2, 3.

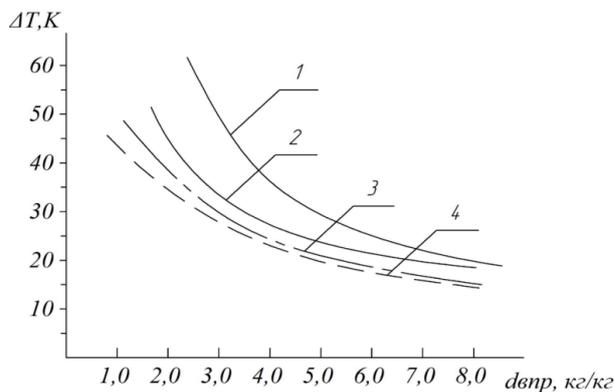


Рис. 2. Влияние режима работы РПК на величину температуры нагнетаемого газа: давление всасывания 0,1 МПа; 1, 2 — давление нагнетания 0,8 МПа; 3, 4 — давление нагнетания 0,5 МПа; 1, 3 — $U = 30$ м/с; 2, 4 — $U = 50$ м/с

Fig. 2. Influence of the operating mode of the RVC on the temperature of the discharged gas: suction pressure 0,1 MPa; 1, 2 — discharge pressure 0,8 MPa; 3, 4 — discharge pressure 0,5 MPa; 1, 3 — $U = 30$ m/s; 2, 4 — $U = 50$ m/s

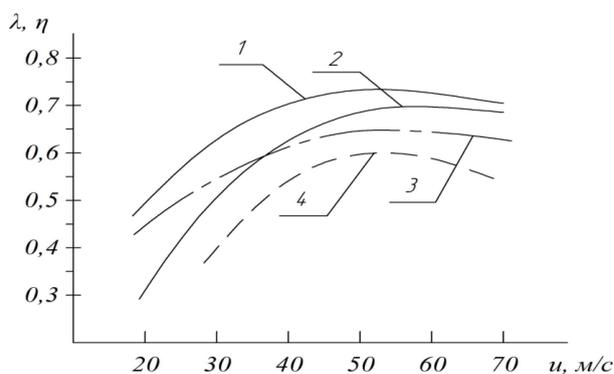


Рис. 3. Влияние режима работы РПК на величину коэффициента подачи (1,2) и на индикаторный изотермический КПД (3,4): давление всасывания 0,1 МПа; давление нагнетания 0,6 МПа; 1, 3 — $d_{всп} = 9$ кг/кг; 2, 4 — $d_{всп} = 3$ кг/кг

Fig. 3. Influence of the operating mode of the RVC on the value of the supply coefficient (1, 2) and on the indicator isothermal efficiency (3, 4): suction pressure 0,1 MPa; discharge pressure 0,6 MPa; 1, 3 — $d_{всп} = 9$ kg/kg; 2, 4 — $d_{всп} = 3$ kg/kg

Анализ температурного режима таких машин показал (рис. 2), что в рассмотренном диапазоне рабочих параметров, в том числе при повышении давления газа в одной ступени от 0,1 МПа до 0,8 МПа, гарантированно обеспечивается допустимый уровень температуры нагнетания, в том числе отвечающий требованиям опасных производств [30, 31], то есть не более 408 К (135 °С). Также выявлено, что при относительном количестве впрыскиваемой воды более 5,0 кг воды на 1,0 кг газа температура нагнетания не превышает 373 К (100 °С).

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что при окружной скорости периферийных участков пластин 40...60 м/с можно ожидать вполне удовлетворительных показателей эффективности рабочего процесса. На практике, при использовании прямого привода от электродвигателя с числом оборотов ротора 3000 об/мин, диаметр цилиндра РПК может составить около 0,4 м.

Как уже было показано выше, соответствующие проблемы снижения внутренних перетечек газа, а также потерь мощности на трение и износ пластин, связанных с высокими окружными скоростями, могут быть успешно решены с учётом существующих и прогнозных инновационных решений [23].

Выводы и заключение

Представленные результаты обзорно-аналитического и расчётно-теоретического анализа позволяют прогнозировать появление нового технического требования к вновь разрабатываемой компрессорной технике, связанного с интенсивным внедрением цифровых платформ, в том числе технологических, обеспечивающих надёжность и эффективность функционирования крупных производственных комплексов. При этом программы по созданию цифровых платформ могли бы стать эффективным инструментом для реализации требований потенциального потребителя к формированию технического облика перспективных компрессорных систем.

Средства, вложенные в программу непрерывного технического перевооружения технологического оборудования, позволяют не только снизить затраты на разработку IT-продуктов и цифровых платформ, на их последующую адаптацию, модернизацию, эксплуатацию и тиражирование, но и повысить надёжность и безопасность сложных технологических комплексов как за счёт повышения степени соответствия виртуальных и физических объектов, так и путем улучшения номинальных (паспортных) характеристик этого оборудования.

На примере компрессорной техники показано, что существующий парк технологических машин для сжатия газов не только не удовлетворяет требованиям современного производства, но и не соответствует заявляемым параметрам создаваемых цифровых платформ, необходимым для обеспечения эффективности их функционирования применительно к компрессорным системам. Одним из очевидных направлений решения этой проблемы является замена поршневых компрессоров на центробежные и роторные, в том числе замена поршневых компрессоров для сжатия водородсодержащих газов на более простые и надёжные аналоги, например, на ротационно-пластинчатые компрессоры с подачей в проточную часть воды или других технологических жидкостей.

Список источников

1. Шесть ключевых задач в экономике России на 2023 год. Стенограмма выступления Владимира Путина на заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma> (дата обращения: 16.12.2022).
2. ЦИПР 2023: Основные поручения Михаила Мишустина. URL: <https://www.content-review.com/articles/60029/> (дата обращения: 02.06.2023).
3. Герман Греф назвал пять технологий для достижения первенства в мире. URL: <https://www.vedomosti.ru/finance/articles/2023/04/12/970619-gref-opisal-osnovi-dlya-tehnologicheskogo-progiva-rossii> (дата обращения: 20.05.2023).
4. «Газпром нефть» и компания «Цифра» создали российскую цифровую платформу для управления производством. URL: <https://www.itweek.ru/iot/news-company/detail.php?ID=222937> (дата обращения: 24.02.2023).

5. Третьяков Н. А., Череповицын А. Е. Цифровая трансформация арктического нефтегазового комплекса: новые вызовы и возможности // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2022. № 1. С. 17 – 32. EDN: SMPQGG. DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.002.
6. Эффективное производство 4.0 (машиностроение и металлообработка): практ. пром. конф. URL: <https://oee-conf.ru/materials> (дата обращения: 24.02.2023).
7. Маск считает, что развитие ИИ может грозить уничтожением человечества. URL: <https://news.mail.ru/society/55871015/?> (дата обращения: 18.04.2023).
8. Делягин М. Г. Информационные технологии против разума: постановка проблемы. URL: <https://delyagin.ru/articles/183-sobytiya/109652-informatsionnye-tehnologii-protiv-razuma-postanovka-problemy> (дата обращения: 28.05.2023).
9. ГОСТ Р 53737-2009 (ИСО 13707:2000). Нефтяная и газовая промышленность. Поршневые компрессоры. Общие технические требования. Введ. 2011–01–01. Москва: Стандартинформ, 2012. 156 с.
10. Общие технические условия по ремонту поршневых компрессоров. Волгоград: Миннефтехиммаш СССР, 1985. 363 с.
11. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции. Москва: КолосС, 2008. 711 с.
12. Видякин Ю. А., Добровольский Е. Б., Кондратьева Т. Ф. Оппозитные компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1979. 279 с.
13. РД 39-0148139-0001-2000. Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (дата обращения: 06.03.2023).
14. Байков И. Р., Китаев С. В., Файрушин Ш. З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 3 (63). С. 28 – 30.
15. Фуладиванда М., Хейдари М. А. Исследование влияния хлорид-ионов на подпиточные водородные компрессоры = Fouladivanda M., Heidary M. A. A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors / пер. с англ. М. А. Федоровой // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 75 – 84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84.
16. Захаренко А. В., Захаренко В. П. О расчёте нагрузок в многокольцевом поршневом уплотнении компрессоров без смазки высокого давления // Вестник Международной академии холода. 2012. № 2. С. 29 – 32.
17. Бусаров С. С., Беликов А. В., Капелюховский А. А., Капелюховская А. А. Анализ конкурентоспособности водородсодержащих циркуляционных компрессоров на базе тихоходных длинноходовых ступеней // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 1. С. 499 – 503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503.
18. Модернизация компрессора 4M16M-45-35/55. URL: <https://chemtech.ru/sovremennye-tendencii-razvitiya-gorelochnyh-ustrojstv/> (дата обращения: 06.03.2023).
19. Воздушные турбокомпрессоры Tamturbo. URL: <http://compressor-atlas.ru/turbocompressor-tamturbo.html> (дата обращения: 08.05.2023).
20. Центробежные компрессоры SAMSUNG TECHWIN. URL: <https://stechwin.ru/> (дата обращения: 18.06.2023).
21. Компрессоры для систем кондиционирования. URL: <http://danfos.moscow/> (дата обращения: 18.06.2023).
22. Васильев Ю. С., Петреня Ю. К., Солдатова К. В. [и др.]. Труды политехнической научной школы турбокомпрессоростроения 21 века: моногр. Санкт-Петербург: Политех-ПРЕСС, 2023. 384 с. ISBN 978-5-7422-8024-8. EDN: IPZPYO.
23. Юша В. Л., Громов А. Ю., Потапов Ю. А. Анализ перспективных направлений создания отечественной компо-

нентной базы ротационных машин объёмного действия для малой энергетики, холодильной и климатической техники // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 4. С. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25.

24. Российская промышленность сотворила очередное чудо, в которое отказываются верить западные эксперты. URL: https://dzen.ru/a/ZJRdZ-1bt3q_yFy (дата обращения: 23.06.2023).

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

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

27. Сакун И. А. Винтовые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1970. 400 с.

28. Амосов П. Е., Бобриков Н. И., Шварц А. И. [и др.]. Винтовые компрессорные машины. Справочник. Ленинград: Машиностроение, 1977. 256 с.

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

30. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»: приказ от 15.12.2020 г. № 533 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390702> (дата обращения: 23.06.2023).

31. ГОСТ Р 54802-2011 (ИСО 13631:2002). Нефтяная и газовая промышленность. Компрессоры поршневые газовые агрегатированные. Технические требования. Введ. 2013–06–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 92 с.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), г. Омск.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Адрес для переписки: 1978yusha@mail.ru

СУТЯГИНСКИЙ Михаил Александрович, председатель совета директоров АО «Группа компаний «Титан», г. Омск.

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

Адрес для переписки: azot111@bk.ru

УШАКОВ Петр Валерьевич, первый заместитель генерального директора АО НТК «Криогенная техника», г. Омск.

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

Для цитирования

Юша В. Л., Сутягинский М. А., Громов А. Ю., Ушаков П. В., Потапов Ю. А. О взаимосвязи цифровых технологических платформ крупных химических и нефтеперерабатывающих производств с техническим обликом парка компрессорного оборудования // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 4. С. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023 г.

© В. Л. Юша, М. А. Сутягинский, А. Ю. Громов,

П. В. Ушаков, Ю. А. Потапов

ON THE RELATIONSHIP OF DIGITAL TECHNOLOGICAL PLATFORMS OF LARGE CHEMICAL AND OIL REFINING INDUSTRIES WITH THE TECHNICAL APPEARANCE OF THE COMPRESSOR EQUIPMENT FLEET

V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy¹, A. Yu. Gromov², P. V. Ushakov², Yu. A. Potapov¹

¹ «Group of companies «Titan» JSC,
Russia, Omsk, Gubkin Ave., 30, 644035

² Scientific and technical complex «Cryogenic technique» JSC,
Russia, Omsk, 22 Parts'ezda str., bld. 97/1, 644105

Issues related to possible problems in the implementation of digitalization programs for large enterprises for the processing of natural hydrocarbon and mineral raw materials, due to the discrepancy between the technical level of the existing fleet of compressor equipment of these enterprises, both with the requirements of modern production and modern achievements in the field of compressor engineering, are considered. It is noted that the discrepancy between virtual and physical technological objects leads to an overestimation of the costs of creating and maintaining IT products, as well as to a decrease in their efficiency. The ways of improving the element base of compressor equipment are proposed. A theoretical analysis of the functioning of an alternative design of a rotary vane compressor with water supply to its flow part is performed. Its example shows that there are obvious prerequisites for replacing the fleet of existing reciprocating process compressors with more advanced designs, the production of which can be completely based on domestic technologies and localized in the Russian Federation in the interests of the core industries of the processing industry.

Keywords: digitalization, reliability, operational characteristics, reciprocating compressors, water injection rotary vane compressors, mathematical model.

References

1. Shest' klyuchevykh zadach v ekonomike Rossii na 2023 god. Stenogramma vystupleniya Vladimira Putina na zasedanii Soveta po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym proyektam [Six key tasks in the Russian economy for 2023. Transcript of Vladimir Putin's speech at a meeting of the Council for Strategic Development and National Projects]. URL: <https://rg.ru/2022/12/15/stenogramma> (accessed: 16.12.2022). (In Russ.).
2. TSIPR 2023: Osnovnyye porucheniya Mikhaila Mishustina [CIRP 2023: Key Assignments of Mikhail Mishustin]. URL: <https://www.content-review.com/articles/60029/> (accessed: 02.06.2023). (In Russ.).
3. German Gref nazval pyat' tekhnologiy dlya dostizheniya pervstva v mire [Herman Gref named five technologies to achieve world supremacy]. URL: <https://www.vedomosti.ru/finance/articles/2023/04/12/970619-gref-opisal-osnovi-dlya-tehnologicheskogo-proriva-rossii> (accessed: 20.05.2023). (In Russ.).
4. «Gazprom nef't» i kompaniya «Tsifra» sozdali rossiyskuyu tsifrovuyu platformu dlya upravleniya proizvodstvom [Gazprom Neft and Tsifra Group created a Russian digital platform for production management]. URL: <https://www.itweek.ru/iot/news-company/detail.php?ID=222937> (accessed: 24.02.2023). (In Russ.).
5. Tretyakov N. A., Cherepovitsyn A. E. Tsifrovaya transformatsiya arkticheskogo neftegazovogo kompleksa: novyye vyzovy i vozmozhnosti [Digital transformation of the arctic oil and gas industrial complex: new challenges and opportunities] // Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka // Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka. Sever i Rynek: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka 2022. No. 1. P. 17 – 32. DOI:10.37614/2220-802X.1.2022.75.002. EDN: CMPQGG. (In Russ.).
6. Effektivnoye proizvodstvo 4.0 (mashinostroyeniye i metalloobrabotka): prakt. prom. konf. [Efficient Production 4.0 (mechanical engineering and metalworking): practical industrial conference]. URL: <https://oe-conf.ru/materials> (accessed: 24.02.2023). (In Russ.).
7. Mask schitayet, chto razvitiye II mozhet grozit' unichtozheniyem chelovechestva [Musk believes the development of Artificial Intelligence could threaten to destroy humanity]. URL: <https://news.mail.ru/society/55871015/?> (accessed: 18.04.2023). (In Russ.).
8. Delyagin M. G. Informatsionnyye tekhnologii protiv razuma: postanovka problem [Information technology versus reason: framing the problem]. URL: <https://delyagin.ru/articles/183-sobytiya/109652-informatsionnye-tehnologii-protiv-razuma-postanovka-problemy> (accessed: 28.05.2023). (In Russ.).
9. GOST R 53737-2009 (ISO 13707:2000). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Porshnevyye kompressory: Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Reciprocating compressors. General technical requirements]. Moscow, 2012. 156 p. (In Russ.).
10. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya po remontu porshnevnykh kompressorov [General technical conditions for repair of reciprocating compressors]. Volgograd, 1985. 363 p. (In Russ.).
11. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 2. Osnovy proyektirovaniya. Konstruktsii [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 2. Fundamentals of design. Constructions]. Moscow, 2008. 711 p. (In Russ.).
12. Vidyakin Yu. A., Dobrovolskiy E. B., Kondratyeva T. F. Opozitnyye kompressory [Opposite compressors]. Leningrad, 1979. 279 p. (In Russ.).
13. RD 39-0148139-0001-2000. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kompressornykh stantsiy na baze

tekhnicheskoy diagnostiki [System of maintenance and repair of compressor stations based on technical diagnostics]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082157> (accessed: 06.03.2023). (In Russ.).

14. Baykov I. R., Kitayev S. V., Fayrushin Sh. Z. Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov [Diagnostics of reciprocating compressors' technical conditions] // *Energobezопасnost' i energosberezheniye. Energy Security and Energy Saving*. 2015. No. 3 (63). P. 28–30. (In Russ.).

15. Fuladivanda M., Heidary M. A. Issledovaniye vliyaniya khlorid-ionov na podpitochnyye vodorodnyye kompressory [A study into the impact of chloride ions on the make-up hydrogen compressors] / trans. from Engl. M. A. Fedorova // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 75–84. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-75-84. (In Russ.).

16. Zakharenko A. V., Zakharenko V. P. O raschete nagruzok v mnogokol'tsevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya [Calculating loads for a multi-ring piston seal in high-pressure oil-free compressors] // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2012. No. 2. P. 29–32. (In Russ.).

17. Busarov S. S., Belikov A. V., Kapelyukhovskiy A. A., Kapelyukhovskaya A. A. Analiz konkurentosposobnosti vodorodosoderzhashchikh tsirkulyatsionnykh kompressorov na baze tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Analysis of the competitiveness of hydrogen-containing circulation compressors based on low-speed long-stroke stages] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskoye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2023. Issue 1. P. 499–503. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-1-499-503. (In Russ.).

18. Modernizatsiya kompressora 4M16M-45-35/55 [Modernization of 4M16M-45-35/55 compressor]. URL: <https://chemtech.ru/sovremennyye-tendencii-razvitiya-gorelochnykh-ustroystv/> (accessed: 06.03.2023). (In Russ.).

19. Vozdushnyye turbokompressory Tamturbo [Tamturbo air turbochargers]. URL: <http://compressor-atlas.ru/turbocompressor-tamturbo.html> (accessed: 08.05.2023). (In Russ.).

20. Tsentrobezhnyye kompressory SAMSUNG TECHWIN [SAMSUNG TECHWIN centrifugal compressors]. URL: <https://stechwin.ru/> (accessed: 18.06.2023). (In Russ.).

21. Kompressor dlya sistem konditsionirovaniya [Compressors for air conditioning systems]. URL: <http://danfos.moscow/> (accessed: 18.06.2023). (In Russ.).

22. Vasil'yev Yu. S., Petrenya Yu. K., Soldatova K. V. [et al.]. Trudy politekhnicheskoy nauchnoy shkoly turbokompressorostroyeniya 21 veka [Proceedings of the Polytechnic Scientific School of Turbocompressor Engineering of the 21st Century]. Saint Petersburg, 2023. 384 p. ISBN 978-5-7422-8024-8. EDN: IPZPYO. (In Russ.).

23. Yusha V. L., Gromov A. Yu., Potapov Yu. A. Analiz perspektivnykh napravleniy sozdaniya otechestvennoy komponentnoy bazy rotatsionnykh mashin ob'yemnogo deystviya dlya maloy energetiki, kholodil'noy i klimaticheskoy tekhniki [The analysis of promising directions for creation of domestic component base of volumetric rotary machines for low power energy, refrigeration and climate technology] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 4. P. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25. (In Russ.).

24. Rossiyskaya promyshlennost' sotvorila ocherednoye chudo, v kotoroye otkazyvayutsya verit' zapadnyye eksperty [Russian industry has created yet another miracle that Western experts refuse to believe in]. URL: https://dzen.ru/a/ZJRdZ-1bt3q_yFy (accessed: 23.06.2023). (In Russ.).

25. Yusha V. L. Sozdaniye i sovershenstvovaniye stupeney kompressorov ob'yemnogo deystviya dlya avtonomnykh mobil'nykh ustanovok [Creation and improvement of volumetric

compressor stages for autonomous mobile units]. Omsk, 2008. 434 p. (In Russ.).

26. Golovintsev A. G., Rumyantsev V. A., Ardashev V. I. [et al.]. Rotatsionnyye kompressory [Rotary compressors]. Moscow, 1964. 315 p. (In Russ.).

27. Sakun I. A. Vintovyye kompressory [Screw compressors]. Leningrad, 1970. 400 p. (In Russ.).

28. Amosov P. E., Bobrikov N. I., Shvarts A. I. [et al.]. Vintovyye kompressornyye mashiny. Spravochnik [Screw compressor machines. Handbook]. Leningrad, 1977. 256 p. (In Russ.).

29. Raikovskiy N. A., Yusha V. L., Kuznetsov K. I., Korenev V. A., Karpus V. S. Analiz mekhanicheskikh poter' v rabochey kamere rotatsionno-plastinchatykh mashin [Analysis of mechanical losses in working chamber of rotary vane machines] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 23–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-23-32. (In Russ.).

30. Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezопасnosti «Obshchiye pravila vzryvobezопасnosti dlya vzryvopozharoopasnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv»: prikaz ot 15.12.2020 g. № 533 [On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety «General rules of explosion safety for explosion and fire hazardous chemical, petrochemical and oil refining production facilities»: Order No. 533 dated 15.12.2020]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390702> (accessed: 23.06.2023). (In Russ.).

31. GOST R 54802-2011 (ISO 13631:2002). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Kompressory porshnevyye gazovyye agregatirovannyye. Tekhnicheskoye trebovaniya [Petroleum and natural gas industries. Packaged reciprocating gas compressors. Technical requirements]. Moscow, 2014. 92 p. (In Russ.).

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

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: 1978yusha@mail.ru

SUTYAGINSKIY Mikhail Alexandrovich, Chairman of the Board of Directors of «Group of companies «Titan» JSC, Omsk.

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

Correspondence address: azot111@bk.ru

USHAKOV Petr Valeryevich, First Deputy General Director of Scientific and Technical Complex «Cryogenic Technique» JSC, Omsk.

POTAPOV Yuri Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of Development and New Technologies Department of «Group of companies «Titan» JSC, Omsk.

For citations

Yusha V. L., Sutyaginskiy M. A., Gromov A. Yu., Ushakov P. V., Potapov Yu. A. On the relationship of digital technological platforms of large chemical and oil refining industries with the technical appearance of the compressor equipment fleet // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-4-25-32.

Received February 28, 2023.

© V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy, A. Yu. Gromov,

P. V. Ushakov, Yu. A. Potapov