

АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОРШНЕВОГО ВОДОРОДНОГО КОМПРЕССОРА К НЕСТАБИЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Л. Юша¹, М. А. Сутягинский², Ю. А. Потапов², Г. С. Русских³

¹ОАО «Сибнефтетранспроект»,
Россия, 644042, г. Омск, ул. Иртышская набережная, 11, корп. 1

²АО «Группа компаний «Титан»,
Россия, 644035, г. Омск, пр. Губкина, 22

³Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Рассмотрены вопросы, связанные с возможными проблемами целесообразности эксплуатации существующей системы регулирования производительности технологического поршневого водородного компрессора на крупном химическом производстве и актуальностью её модернизации. На практике модернизация является одним из вариантов реализации импортозамещающих технологий применительно к оборудованию, эксплуатируемому на крупных химических, нефте- и газоперерабатывающих предприятиях. В качестве доминирующих предпосылок приняты технико-экономические факторы; в качестве альтернативного варианта существующей системе регулирования путём отжима клапанов на части хода поршня выбрана технология регулирования изменением величины мёртвого объёма в рабочей камере цилиндра.

Наличие существенных факторов неопределённости при реализации известных методик расчёта потерь производительности действительного рабочего процесса в ступени поршневого компрессора привело к необходимости выполнения вариантных расчётов. Реализация такого подхода обеспечила высокую сходимость результатов расчёта и промышленных испытаний и позволила уточнить величину условно-постоянного показателя политропы конечных параметров, применимую для аналогичных расчётов рассматриваемого объекта. Представлены рекомендации по конструированию поршневых компрессоров с регулируемой производительностью.

Ключевые слова: поршневой компрессор, водород, регулирование производительности, отжим клапанов, изменение мёртвого объёма, производительность, температура нагнетания.

Анализ проблем эксплуатации технологического компрессорного оборудования при нестабильных условиях эксплуатации

В работах [1] показано, что нестабильные условия эксплуатации в общем случае могут быть обусловлены влиянием таких внешних факторов, как природные, технологические, форс-мажорные, управленческие. При этом под нестабильными условиями эксплуатации компрессоров подразумеваются преимущественно так называемые нерасчетные режимы, обусловленные отклонением параметров работы от тех, которые заложены при их проектировании. В качестве причин этих отклонений рассматривается изменение производительности, химического состава сжимаемого газа, давления и температуры на входе, концентрации механических и жидкостных примесей и ряд других.

Применительно к рассматриваемому в данной статье объекту — системе регулирования производительности технологического поршневого водородного компрессора — внешними факторами, вызывающими нестабильные условия эксплуатации, являются форс-мажорные и технологические, обусловленные изменением рабочих режимов, рыноч-

ных взаимосвязей и неудовлетворительными характеристиками существующей конструкции.

К форс-мажорным факторам следует отнести возросшие расходы, связанные с эксплуатацией данной системы. Применяемые в существующей конструкции системы регулирования производительности актуаторы импортного производства, воздействующие на клапаны всасывания, имеют стоимость около 40000€ за один комплект. При наличии двух клапанов всасывания в первой ступени и периодичности их замены не более 1 года непрерывной работы ежегодные затраты только на обслуживание такой системы могут достигать 10 млн рублей. Кроме этого, в 2022–2023 гг. в условиях санкционных ограничений наметился дополнительный рост эксплуатационных расходов, связанных с выполнением зарубежными поставщиками своих контрактных обязательств.

К технологическим проблемам, возникающим при эксплуатации существующей системы регулирования производительности поршневого водородного компрессора путём отжима запорного органа клапана всасывания на части хода поршня, являются дополнительные индикаторные потери в клапанах и рост температуры нагнетания. Первые обусловлены необходимостью дополнительного



Рис. 1. Основные направления импортозамещения применительно к находящемуся в эксплуатации технологическому оборудованию
 Fig. 1. The main directions of import substitution in relation to technological equipment in operation

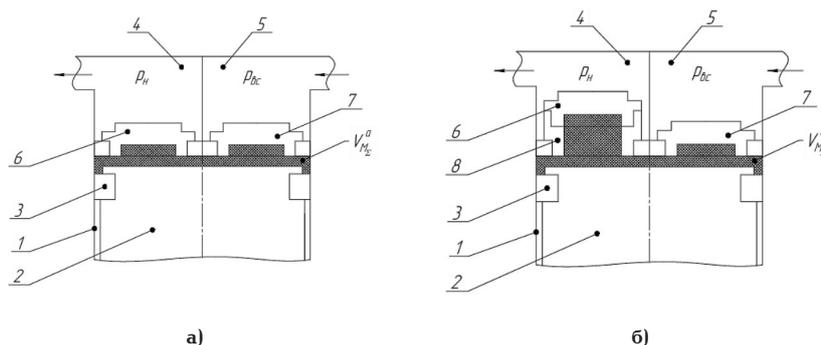


Рис. 2. Схема компрессорной ступени до модернизации а) и после модернизации б):
 1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — уплотнительное кольцо; 4 — камера нагнетания;
 5 — камера всасывания; 6 — клапан нагнетания; 7 — клапан всасывания;
 8 — дополнительная проставка
 Fig. 2. Diagram of the compressor stage before modernization a) and after modernization b) 1 — cylinder; 2 — piston; 3 — sealing ring; 4 — discharge chamber; 5 — suction chamber; 6 — discharge valve; 7 — suction valve; 8 — additional spacer

проталкивания водорода через клапаны всасывания при его частичном выталкивании из рабочей камеры на части хода поршня; вторые — возвратом части подогретого в рабочей полости цилиндра газа в камеру всасывания и подогревом газа в последней, что приводит к повышению температуры газа как в начале, так и в конце процесса сжатия. Кроме этого, клапанные пластины, прижатые силой давления газа к пальцам отжимной вилки актуатора, при соударении с седлом при высоких скоростях получают значительные остаточные деформации, что ускоряет их износ и уменьшает срок службы, снижает герметичность клапана.

Очевидно, что в сегодняшних условиях этот пример — наглядная иллюстрация к общей проблеме импортозамещения в РФ [2, 3].

Применительно к технологическому оборудованию зарубежных производителей в зависимости от степени несоответствия их технического состояния требуемым критериям возможны следующие основные варианты импортозамещающих технологий (рис. 1): полная замена оборудования (например, доля импорта в потреблении насосов и компрессоров для технологических процессов нефтепереработки должна была сократиться с 90 % (2014 г.) до 20 % (2020 г.) [4]; изготовление аналогов, полностью копирующих оригинальные детали и узлы [5–7]; разработка и изготовление альтернативных систем, узлов и деталей [8]. В отношении рассматриваемого объекта анализ существующих способов регулирования производительности поршневых компрессоров [9, 10] показал, что боль-

шинство из этих проблем может быть преодолено в случае применения технологии регулирования производительности путём изменения величины мёртвого объёма. Разработка и изготовление элементов конструкции устройства для реализации такой технологии доступно для реализации на отечественной производственной базе.

Методика расчёта, анализ факторов неопределённости, результаты модернизации

Объектом исследования данной статьи является первая ступень поршневого водородного компрессора на режимах регулирования производительности путём дискретного изменения мёртвого объёма (рис. 2).

Принципиальная идея модернизации конструкции ступени заключается в том, что за счёт установки дополнительной проставки 8 величина мёртвого объёма ступени после модернизации (V_{M2}^b) становится больше номинальной его величины (V_{M2}^a). При необходимости аналогичные дополнительные проставки могут быть установлены во всех клапанных узлах. Из теории поршневых компрессоров [9, 10] известен характер влияния изменения величины мёртвого объёма и величины показателя политропы конечных параметров на процесс обратного расширения и на изменение действительной производительности ступени поршневого компрессора (рис. 3).

Изменение действительной производительности компрессорной ступени при одном и том же из-

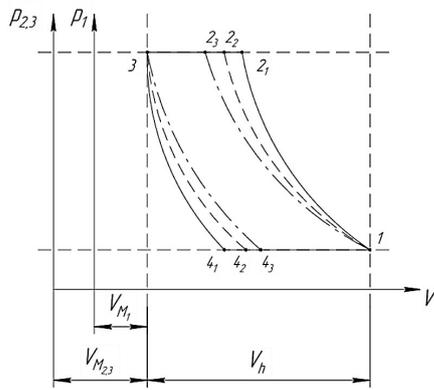


Рис. 3. Пример схематизированных индикаторных диаграмм при различной величине мёртвого объёма и показателей политропы конечных параметров ($m_1 = m_2 > m_3$)

Fig. 3. An example of schematized indicator diagrams for different values of dead volume and polytropic indicators of final parameters ($m_1 = m_2 > m_3$)

менении величины мёртвого объёма ($\Delta V_M = V_{M_{2,3}} - V_{M_1}$) может существенно отличаться при различных величинах показателя политропы конечных параметров: при выполнении условия $m_1 = m_2 > m_3$ расхождение между конечными значениями производительностей определяется отрезком $2_2 - 2_3$ (расхождение между потерями производительности на всасывании при этом определяются отрезком $4_2 - 4_3$). Количественная оценка влияния точности расчёта процесса обратного расширения требует дополнительного рассмотрения. И если определение с требуемой точностью геометрической величины мёртвого объёма не составляет проблем, то определение величины показателя политропы конечных параметров требует тщательного анализа, так как известные методики расчёта процесса обратного расширения, объёмного коэффициента и действительной производительности, основанные на ограниченном количестве эмпирического материала, носят по большей части рекомендательный характер и не всегда могут не учитывать особенности реальных объектов.

Для определения требуемых конструктивных параметров рассматриваемого объекта и анализа факторов неопределённости использовалась полуэмпирическая методика расчёта, широко применяемая в технике, в том числе в компрессоростроении [9–11]; некоторые авторы классифицируют такие методики как математические модели 1-го уровня (рода) [12].

В соответствии с [9, 10] потери производительности поршневого компрессора характеризуются величиной коэффициента подачи (или коэффициента производительности):

$$\lambda = V_e / V_T \quad (1)$$

Для режимов регулирования производительности:

$$V_i = V_{e_i} / V_T \quad (2)$$

где V_{e_i} — действительная производительность первой ступени ПК при рассматриваемых режимах ра-

боты; V_T — теоретическая производительность первой ступени [9, 10].

При реализации способа регулирования действительной производительности ступени ПК путём изменения величины мёртвого объёма применяют методику определения объёмного коэффициента [9, 10]:

$$\lambda_0 = \lambda / (\lambda_{AP} \cdot \lambda_{ПЛ} \cdot \lambda_T \cdot \lambda_{ВЛ}), \quad (3)$$

где коэффициенты дросселирования λ_{AP} , плотности $\lambda_{ПЛ}$, подогрева (температурный) λ_T и влажности $\lambda_{ВЛ}$ характеризуют отдельные составляющие общих потерь производительности, характеризуемых величиной коэффициента подачи λ , и определяются по зависимостям и рекомендациям, представленным в [10].

В качестве упрощающего допущения примем, что при изменении величины мёртвого объёма другие составляющие потерь производительности остаются неизменными. Тогда:

$$\lambda_{0i} = \lambda_i / (\lambda_{APi} \cdot \lambda_{ПЛи} \cdot \lambda_{Ti} \cdot \lambda_{ВЛи}). \quad (4)$$

Конструктивной характеристикой изменения величины производительности при реализации способа регулирования действительной производительности ступени ПК путём изменения величины мёртвого объёма является относительный мёртвый объём [9, 10]:

$$a_{Mi} = V_{Mi} / Vh^*, \quad (5)$$

где Vh^* — величина описанного поршнем объёма за один оборот коленчатого вала; V_{Mi} — абсолютная величина рассматриваемого мёртвого объёма рабочей камеры ступени ПК.

Из представленных выше соотношений следует, что

$$a_{Mi} = (1 - \lambda_{0i}) / [(P_H / P_{BC})^{1/m} - 1], \quad (6)$$

где P_H — давление нагнетания ступени ПК; P_{BC} — давление всасывания ступени ПК; m — показатель политропы конечных параметров рабочего газа.

При этом величина абсолютного мёртвого объёма определяется следующим образом:

$$V_{Mi} = a_{Mi} \cdot Vh^*. \quad (7)$$

Величина дополнительного мёртвого объёма, определяющего изменения конструкции проточной части рабочей камеры для каждого из рассматриваемых режимов работы ступени ПК, определяется следующим образом:

$$V_{Mi\text{доп}} = V_{Mi} - V_{M0}. \quad (8)$$

Полученные величины $V_{Mi\text{доп}}$ являются исходными данными для разработки конструктивных элементов узлов регулирования производительности ступени ПК путём дискретного (ступенчатого) изменения величины мёртвого объёма. При этом ограничительным фактором является также величина газодинамических потерь в проточной части модернизируемого узла регулирования производительности, анализ которого в данной статье не рассматривается.

При реализации представленной выше методики расчёта, как уже отмечалось выше, имеет ме-

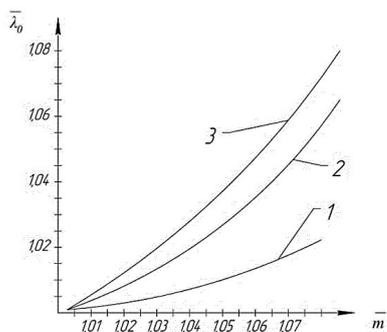


Рис. 4. Влияние изменения величины показателя обратного расширения на изменение величины объёмного коэффициента:

1 — $\alpha_M = 0,1$; 2 — $\alpha_M = 0,25$; 3 — $\alpha_M = 0,4$

Fig. 4. The influence of a change in the value of the reverse expansion indicator on a change in the value of the volume coefficient:

1 — $\alpha_M = 0,1$; 2 — $\alpha_M = 0,25$; 3 — $\alpha_M = 0,4$

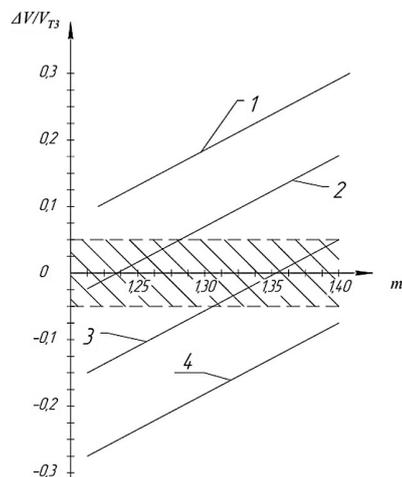


Рис. 5. Влияние величины показателя политропы обратного расширения и величины дополнительного мёртвого объёма на отклонение величины производительности от регламентируемой (на режиме регулирования)

Fig. 5. The influence of the value of the reverse expansion polytropic index and the value of the additional dead volume on the deviation of the productivity value from the regulated value (in the control mode)

сто существенная неопределённость определения величины показателя политропы конечных параметров m в соотношении (6). Известные рекомендации [10] носят достаточно приближённый характер и применительно к рассматриваемому водородному компрессору не учитывают такие факторы, как повышенную текучесть водорода, влияющую на изменение удельных массовых потоков через зазоры в рабочей камере ступени; существенное изменение зазоров в уплотнении цилиндропоршневой группы при износе, а также изменение площади теплообменных поверхностей в рабочей камере при изменении конструкции узла регулирования производительности. В частности, согласно этим рекомендациям, для рассматриваемых режимов работы величина показателя политропы конечных параметров может быть выбрана из достаточно широкого диапазона рекомендуемых величин $m \in \{1,28 \dots 1,36\}$, а с учётом особенностей рассматриваемого объекта, отмеченных выше, не исключено значительное расширение этого диапазона. Предварительная оценка значимости выбора величины m показала, что если при номинальных величинах мёртвого объёма и действительной производительности расхождение в результатах расчёта действительной производительности составляет не более 2 %, то на режимах регулирования это расхождение может достигать 10 % и более (рис. 4). Последнее может оказывать не только существенным, но и недопустимым при обеспечении реальных технологических режимов промышленных установок.

Наличие такого фактора неопределённости, как величина показателя политропы конечных параметров m , привела к необходимости рассматривать некоторую область возможных вариантов исполнения модернизированного узла системы регулирования производительности с различной величиной $V_{\text{м.доп}}$ (варианты 1...4 на рис. 5).

Из представленных результатов следует, что в рассматриваемом диапазоне возможных величин m требуемая производительность (при допуске отклонения $\pm 5\%$) с наибольшей вероятностью будет обеспечена при величине $V_{\text{м.доп}}$ по вариантам 2 и 3. По результатам этого анализа было принято решение изготовить несколько дополнительных проставок (позиция 8 на рис. 2), причём

проставка с минимальной величиной $V_{\text{м.доп}}$ соответствовала варианту 2, а с максимальной величиной $V_{\text{м.доп}}$ — варианту 3. Соответственно, в ходе испытательного метода подбора была обеспечена требуемая производительность на заданном режиме регулирования ($Ve_i = 0,74Ve_{\text{ном}}$). С учётом конструкторско-технологических критериев в качестве основного был выбран вариант 2.

Анализ результатов измерения производительности и температуры нагнетания водородного поршневого компрессора, полученных при его эксплуатации на технологических режимах после модернизации системы регулирования, показал полное их соответствие требованиям безопасности при нормальном состоянии уплотнительных колец [13, 14]. Полученные результаты (рис. 5) позволяют сделать вывод, что для рассматриваемого типа поршневых компрессоров рекомендуемая величина показателя политропы конечных параметров может выбираться из диапазона величин $\approx 1,2 \dots 1,28$.

Поскольку в рассматриваемом случае по условиям технологического процесса не требуется плавное регулирование производительности, реализованный вариант модернизации системы регулирования производительности первой ступени поршневого водородного компрессора является более предпочтительным по сравнению с актуатором, исходя из критериев надёжности и эксплуатационных затрат на обслуживание этой системы.

Выводы и заключение

Представленные в статье результаты модернизации системы регулирования производительности первой ступени поршневого водородного компрессора являются практическим подтверждением актуальности разработки, изготовления и внедрения отечественных разработок в случае необходимости замены отдельных компонентов импортного оборудования, определяемой преобладающими кри-

териями конкретного технологического процесса. Внедрение технологии регулирования действительной производительности поршневого компрессора путём дискретного изменения величины мёртвого объёма в рабочей камере ступени обеспечило полное выполнение требований по величине производительности (отклонение от требуемой величины составило не более 2 %) и по температуре нагнетания, которая на всех рабочих режимах при нормальном работающем поршневых кольцах не превышала 400 К. В ходе выполнения расчётно-проектировочных работ была уточнена полуэмпирическая методика расчёта объёмного коэффициента в части величины показателя политропы конечных параметров, которую для данного типа поршневых компрессоров рекомендуется принимать в диапазоне 1,2...1,28.

Следует, однако, отметить ограниченные возможности реализации используемого способа регулирования в рамках существующей конструкции, обусловленной размерами камер всасывания и нагнетания. Недостаточные геометрические размеры этих камер обусловили: во-первых, невозможность реализации более эффективного способа регулирования производительности путём плавного изменения величины мёртвого объёма; во-вторых, изменение производительности в рассматриваемом случае не могло превышать 50 % от номинальной величины. По-видимому, при разработке новых базовых конструкций цилиндров поршневых компрессоров было бы целесообразно предусмотреть возможность опционального применения устройств для плавного регулирования производительности в диапазоне от 100 % до 0 % за счёт увеличения монтажных размеров гнезд для клапанов в камерах всасывания и нагнетания.

Список источников

1. Ваяншов А. Д., Юша В. Л. Методы и технологии адаптации основного и вспомогательного оборудования компрессорных установок и станций к нестабильным условиям эксплуатации // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 3. С. 24–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-24-35. EDN: JMGPPK.
2. Круть А. А. Обеспечение экономической безопасности на основе государственной политики импортозамещения: автореф. дис. ... канд. эконом. наук. Мытищи, 2022. 28 с.
3. Стенограмма парламентских слушаний на тему «О поддержке импортозамещения продукции, услуг и технологий, критически важных с точки зрения зависимости от импорта, в гражданских отраслях промышленности Российской Федерации», 17 октября 2022 года. URL: <http://council.gov.ru/media/files/xzDZz4guuuBbdAlApGUAfsAz8puK04jY.pdf> (дата обращения: 18.12.2023).
4. Устакова Д. А., Грибов В. В., Богданова Н. В. Нормативная база импортозамещения // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сб. ст. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Екатеринбург, 23 мая 2019 г. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2019. С. 55–63. EDN: WRXJLU.
5. Реинжиниринг или реверс-инжиниринг. URL: <https://delta-tech.pro/re-engineering> (дата обращения: 18.12.2023).
6. Реинжиниринг промышленного оборудования. URL: <https://engineering.moscow/re-eng> (дата обращения: 18.12.2023).
7. Реинжиниринг проектирование. URL: <https://inengengrupp.ru/> (дата обращения: 18.12.2023).

8. Мищенко И. К., Мищенко В. В. Импортозамещение VS модернизация // Алтайский вестник Финансового университета. 2017. № 2. С. 21–32. EDN: YMDVKD.

9. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1969. 744 с.

10. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

11. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 405 с.

12. Болштянский А. П., Белый В. Д., Дорошевич С. Э. Компрессоры с газостатическим центрированием поршня. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 406 с. ISBN 5-81-49-0078-4.

13. 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: 18.12.2023).

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

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), главный специалист технического отдела ОАО «Сибнефтетранспроект», 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.

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

РУССКИХ Григорий Серафимович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Основы теории механики и автоматического управления» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1057-2344

ORCID: 0000-0001-5495-6997

AuthorID (SCOPUS): 57191032330

ResearcherID: L-9913-2013

Для цитирования

Юша В. Л., Сутягинский М. А., Потапов Ю. А., Русских Г. С. Адаптация системы регулирования производительности технологического поршневого водородного компрессора к нестабильным условиям эксплуатации // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 29–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-29-35.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024 г.

© В. Л. Юша, М. А. Сутягинский,

Ю. А. Потапов, Г. С. Русских

ADAPTATION OF THE PERFORMANCE CONTROL SYSTEM OF A TECHNOLOGICAL PISTON HYDROGEN COMPRESSOR TO UNSTABLE OPERATING CONDITIONS

V. L. Yusha¹, M. A. Sutyaginskiy², Yu. A. Potapov², G. S. Russkikh³

¹OJSC «Sibneftetransproekt»,
Russia, Omsk, Irtyshskaya Embankment Str., bld. 11/1, 644042

²JSC «Group of companies «Titan»,
Russia, Omsk, Gubkin Ave., 30, 644035

³Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Issues related to possible problems of the feasibility of operating the existing system for regulating the performance of a technological piston hydrogen compressor at a large chemical production and the relevance of its modernization are considered. In practice, modernization is one of the options for implementing import-substituting technologies in relation to equipment operated at large chemical, oil and gas processing enterprises. Technical and economic factors are accepted as the dominant prerequisites; as an alternative to the existing control system by squeezing the valves for part of the piston stroke, a control technology is chosen by changing the value of the dead volume in the working chamber of the cylinder.

The presence of significant uncertainty factors in the implementation of known methods for calculating the productivity losses of the actual working process in the stage of a piston compressor has led to the need to perform variant calculations. The implementation of this approach ensured high convergence of the results of calculations and industrial tests and made it possible to clarify the value of the conditionally constant polytropic index of the final parameters, applicable for similar calculations of the object under consideration. Recommendations for the design of piston compressors with variable capacity are presented.

Keywords: piston compressor, hydrogen, capacity control, valve pressing, dead volume change, capacity, discharge temperature.

References

1. Vanyashov A. D., Yusha V. L. Metody i tekhnologii adaptatsii osnovnogo i vspomogatel'nogo oborudovaniya kompressornykh ustanovok i stantsiy k nestabil'nyim usloviyam ekspluatatsii [Methods and technologies for adaptation of main and auxiliary equipment of compressor plants and stations to unstable operating conditions] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 3. P. 24–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-24-35. EDN: JMGPPK. (In Russ.).
2. Krut' A. A. Obespecheniye ekonomicheskoy bezopasnosti na osnove gosudarstvennoy politiki importozameshcheniya [Ensuring economic security on the basis of the state policy of import substitution]. Mytishchi, 2022. 28 p. (In Russ.).
3. Stenogramma parlamentskikh slushaniy na temu «O podderzhke importozameshcheniya produktsii, uslug i tekhnologii, kriticheskii vazhnykh s tochki zreniya zavisimosti ot importa, v grazhdanskikh otraslyakh promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii», 17 oktyabrya 2022 goda [Transcript of parliamentary hearings on «On Supporting Import Substitution of Products, Services and Technologies Critical to Import Dependence in the Civilian Industries of the Russian Federation», 17 October 2022]. URL: <http://council.gov.ru/media/files/xzDz4guuuBbdAlApGU AfsAz8puK04jY.pdf> (accessed: 18.12.2023). (In Russ.).
4. Ustakova D. A., Gribov V. V., Bogdanova N. V. Normativnaya baza importozameshcheniya [Normative base of import substitution] // Tekhnicheskoye regulirovaniye v edinom ekonomicheskom prostranstve. *Technical Regulation in the Common Economic Space*. Ekaterinburg, 2019. P. 55–63. EDN: WRXJLU. (In Russ.).
5. Reinzhiniring ili revers-inzhiniring [Re-engineering or reverse-engineering]. URL: <https://delta-tech.pro/re-engineering> (accessed: 18.12.2023). (In Russ.).
6. Reinzhiniring promyshlennogo oborudovaniya [Re-engineering of industrial equipment]. URL: <https://engineering.moscow/re-eng> (accessed: 18.12.2023). (In Russ.).
7. Reinzhiniring proyektirovaniye [Re-engineering design]. URL: <https://ingenergrupp.ru/> (accessed: 18.12.2023). (In Russ.).
8. Mishchenko I. K., Mishchenko V. V. Importozameshcheniye VS modernizatsiya [Import substitution VS modernization] // *Altayskiy vestnik Finansovogo universiteta. Altayskiy Vestnik Finansovogo Universiteta*. 2017. No. 2. P. 21–32. EDN: YMDVKD. (In Russ.).
9. Frenkel M. I. Porshnevyye kompressory. Teoriya, konstruksii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors. Theory, constructions and fundamentals of design]. 3rd ed., revised and supplemented. Leningrad, 1969. 744 p. (In Russ.).
10. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
11. Zarubin V. S. Matematicheskoye modelirovaniye v tekhnike [Mathematical modelling in engineering]. Moscow, 2010. 405 p. (In Russ.).
12. Bolshtyanskiy A. P., Belyy V. D., Doroshevich S. E. Kompressory s gazostaticheskimi tsentrirovaniyem porshnya

[Compressors with gas-static piston centring]. Omsk, 2002. 406 p. ISBN 5-81-49-0078-4. (In Russ.).

13. Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Obshchiye pravila vzyvobezopasnosti dlya vzyvopozharoopasnykh 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] // Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. *Federal Service for the Supervision of Environment, Technology and Nuclear Management*. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1> (accessed: 18.12.2023). (In Russ.).

14. GOST R 54802-2011 (ISO 13631:2002). Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Kompresory porshnevyye gazovyye agregatirovannyye. Tekhnicheskiye 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, Chief Specialist of Technical Department, OJSC «Sibneftetransproekt», 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 JSC «Group of Companies «Titan», Omsk.

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

RUSSKIKH Grigory Serafimovich, Candidate of Technical Sciences, Head of Fundamentals of Theory of Mechanics and Automatic Control Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1057-2344

ORCID: 0000-0001-5495-6997

AuthorID (SCOPUS): 57191032330

ResearcherID: L-9913-2013

For citations

Yusha V. L., Sutyaginskiy M. A., Potapov Yu. A., Russkikh G. S. Adaptation of the performance control system of a technological piston hydrogen compressor to unstable operating conditions // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 29–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-29-35.

Received April 26, 2024.

© V. L. Yusha, M. A. Sutyaginskiy, Yu. A. Potapov, G. S. Russkikh