

МЕТОД ПОИСКА СООТНОШЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТИХОХОДНЫМ КОМПРЕССОРНЫМ СТУПЕНЯМ

С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Т. А. Винникова,
Н. Г. Синицин, К. А. Бакулин

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

В работе представлена методика поиска соотношения конструктивных и режимных факторов применительно к тихоходным компрессорным ступеням. Методика основана на симплекс-методе, позволяющем выбирать из базы данных, созданной на основе известной методики расчета рабочих процессов тихоходных компрессорных ступеней, наилучшее решение по конкретным критериям поиска с учетом их значимости. Методика реализована в программе Microsoft Excel, представлен пример реализации методики с пятью критериями: температурой, коэффициентом подачи, индикаторным КПД, массой и габаритными размерами.

Ключевые слова: тихоходный длинноходовой компрессор, рабочий процесс, методы оптимизации, критерии поиска, вес критериев, интегральные характеристики.

Введение

При работе с заказчиком нередко возникает необходимость осуществлять подбор оборудования на основании индивидуальных (субъективных) предпочтений заказчика. При этом из всего многообразия однотипного оборудования необходимо выделить несколько вариантов, наилучшим образом решающих поставленные задачи. Желательно, чтобы при этом процесс выбора был автоматизирован, то есть занимал немного времени. Такой подход предположительно увеличит интерес к продаваемому изделию.

В данной работе изделием, на котором опробована данная методика, является тихоходная длинноходовая воздушная компрессорная ступень.

Такие ступени, как было показано в многочисленных работах [1–3], позволяют сжимать газ до высоких и средних давлений в одной ступени сжатия за счет сочетания вытянутой рабочей камеры с отношением хода поршня к диаметру цилиндра более 10 и временем рабочего цикла от 2 до 4 с при приемлемой температуре сжатого газа.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

- 1) на основании известной методики расчета создать базу данных тихоходных компрессорных ступеней;
- 2) провести исследования по определению методики поиска наилучшего решения;
- 3) создать программу расчета;
- 4) провести анализ и сделать выводы.

Методика исследования

Для реализации поставленной цели представляет интерес так называемый симплекс-метод [4–10]. Суть данного метода сводится к получению функции, зависящей от принятых заказчиком критери-

ев с учетом значимости каждого критерия, расчета функции для каждого элемента из базы данных и выбора элемента, для которого искомая функция принимает максимальное значение [5]:

$$F(A_i) = \sum_{i=1}^n a_i f_i(A_i), \quad (1)$$

где A_i — критерий поиска; a_i — вес (значимость критерия); $f_i(A_i)$ — нормируемый параметр.

Когда мы имеем дело с прикладными многокритериальными задачами, критерии перестают быть абстрактными числовыми функциями, они наполняются конкретным содержанием. Точнее, значения этих функций начинают выражать величины, принадлежащие той ли иной количественной шкале и измеряться в тех или иных единицах измерения. Как известно, основными количественными шкалами являются: абсолютная шкала, шкала отношений, шкала разностей и шкала интервалов.

Если значения критериев, участвующих в нашей многокритериальной задаче однотипны, т.е. принадлежат одной шкале и измеряются в одних и тех же единицах, то их линейная свертка заведомо будет иметь смысл. Однако на практике подобного рода ситуации крайне редки, поскольку в таких случаях, как правило, можно избежать многокритериальности и свести рассматриваемую задачу к однокритериальной. Например, если нас интересуют m различного рода затрат, связанных с производством некоторого продукта, то нет смысла рассматривать задачу с m критериями, можно просто сложить все эти затраты вместе и решать задачу с одним суммарным критерием.

Многокритериальность возникает именно по причине «разнородности» имеющихся критериев, поскольку их не удается «свернуть» в одну формулу из-за того, что значения участвующих в задаче

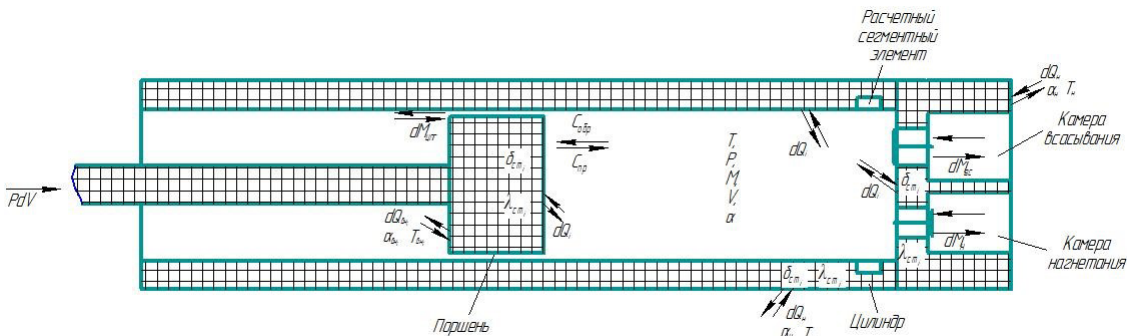


Рис. 1. Расчетная схема поршневой ступени с линейным приводом
Fig. 1. Design diagram of a piston stage with a linear drive

критериев, как правило, принадлежат различным шкалам и измеряются в различных единицах. Типичный пример подобного вида из области экономики — получить максимальную прибыль за минимальное время.

Прибыль измеряется в шкале отношений, тогда как время — в шкале интервалов. Единицами прибыли могут быть рубли, доллары и пр., а единицами времени служат часы, дни, годы и т.д. Разве можно сложить вместе критерий прибыли и критерий времени? Такая сумма даже с использованием коэффициентов (т.е. свертка), является некорректной. Как же следует поступать в таких случаях?

Для решения этой проблемы обычно используют прием, который носит название «нормализация критериев», заключающийся в приведении разнотипных критериев к единой шкале. Правда, получающаяся таким образом «искусственная» шкала не имеет ничего общего с упомянутыми выше теми или иными представителями «естественных» количественных шкал. Этот прием заключается в применении к критериям таких монотонных преобразований, которые в той или иной степени «уравнивают» пределы изменения данных критериев. Наиболее распространенным преобразованием данного типа является замена исходного критерия f_i на преобразованный критерий вида:

$$f_i(A_i) = \frac{f_n(A_i) - \min(f_n(A_i))}{\max(f_n(A_i)) - \min(f_n(A_i))}, \quad (2)$$

$$\min(f_n(A_i)) \neq \max(f_n(A_i)),$$

где $f_n(A_i)$ — значение параметр; $\max(f_n(A_i))$ — максимальное значение параметра в рассматриваемом диапазоне; $\min(f_n(A_i))$ — минимальное значение параметра в рассматриваемом диапазоне.

На основании общепринятых критериев эффективности рабочих процессов поршневых компрессорных ступеней [11–17] в качестве определяющих критериев были приняты температура, коэффициент подачи и индикаторный изотермический КПД. Дополнительно в качестве потенциально интересных критериев для заказчика можно принять массу и объем ступени. Тогда для данного примера искомая функция будет иметь следующий вид:

$$F(T, \lambda, \eta, m, V) = a_T \cdot T^{\text{норм}} + a_\lambda \cdot \lambda^{\text{норм}} + a_\eta \cdot \eta^{\text{норм}} + a_m \cdot m^{\text{норм}} + a_V \cdot V^{\text{норм}}.$$

На самом деле критериев, по которым может быть осуществлен выбор рациональной конструкции тихоходной ступени, много и они могут быть использованы в различных сочетаниях в зависимости от поставленной задачи.

Для получения базы данных была применена верифицированная методика расчета [18]. Расчетная схема (рис. 1), основные допущения и расчетные формулы представлены ниже.

Условия однозначности: геометрические условия — диаметр цилиндра — 0,02...0,05 м; ход поршня — 0,1...0,5 м; геометрические параметры клапанов; граничные условия — температура всасывания — 290 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — 0,3–10,0 МПа; температура охлаждающей среды 290 К, охлаждающая среда — вода, воздух; физические условия — сжимаемый газ — воздух; время рабочего цикла — 2...6 с.

Ряд упрощающих допущений, принятых при разработке математической методики расчета [18]:

1. Газовая среда непрерывна и гомогенна.
2. Моделируемые процессы обратимы, равновесны и квазистатичны.
3. Параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объему рабочей камеры.
4. Изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало.
5. Теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу.
6. Параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны.
7. Течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным и квазистационарным.
8. Теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный.
9. Коэффициент теплоотдачи в каждый момент времени одинаков на всех внутренних поверхностях рабочей камеры.

Уравнение для определения давления газа на j -м шаге:

$$P_j = \frac{\xi_j \cdot R \cdot U_j}{V_j \cdot C_{v,j}}. \quad (3)$$

Уравнение, описывающее закон сохранения энергии для тела переменной массы (с учетом утечек через неплотности рабочей камеры):

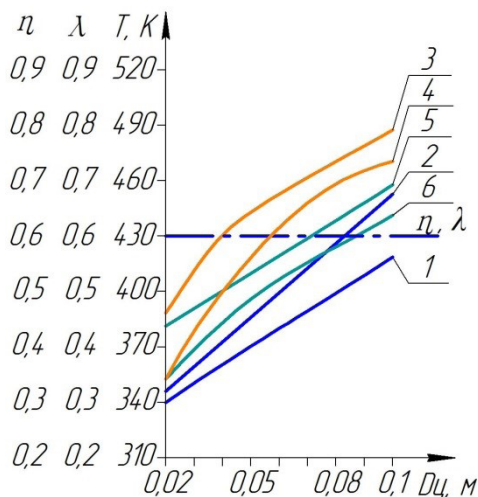


Рис. 2. Значения осредненной температуры (1, 2), коэффициента подачи (3, 4) и КПД (5, 6) нагнетаемого газа в зависимости от принятого в конструкции диаметра цилиндра при ходе поршня $S = 0,5$ м и времени цикла $\tau = 3$ с:
 параметры 1, 3, 5 — $P_d = 5$ МПа;
 параметры 2, 4, 6 — $P_d = 7$ МПа

Fig. 2. The values of the averaged temperature (1, 2), the delivery coefficient (3, 4) and the efficiency (5, 6) of the injected gas depending on the cylinder diameter adopted in the design with the piston stroke $S = 0,5$ m and the cycle time $\tau = 3$ s:
 parameters 1, 3, 5 — $P_d = 5$ МПа;
 parameters 2, 4, 6 — $P_d = 7$ МПа

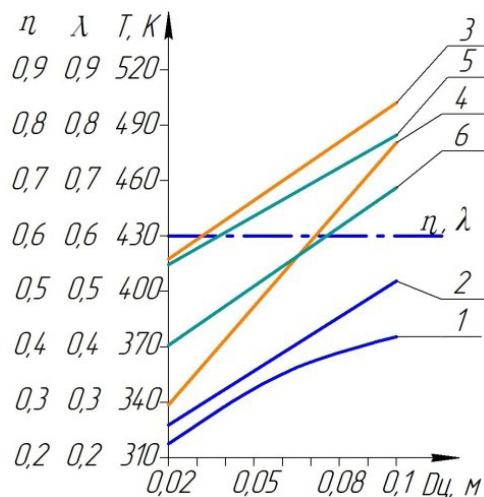


Рис. 3. Значения осредненной температуры (1, 2), коэффициента подачи (3, 4) и КПД (5, 6) нагнетаемого газа в зависимости от принятого в конструкции диаметра цилиндра при ходе поршня $S = 1$ м и времени цикла $\tau = 4$ с:
 параметры 1, 3, 5 — $P_d = 5$ МПа;
 параметры 2, 4, 6 — $P_d = 7$ МПа

Fig. 3. The values of the averaged temperature (1, 2), the delivery coefficient (3, 4) and the efficiency (5, 6) of the injected gas depending on the cylinder diameter adopted in the design with the piston stroke $S = 1$ m and the cycle time $\tau = 4$ s:
 parameters 1, 3, 5 — $P_d = 5$ МПа;
 parameters 2, 4, 6 — $P_d = 7$ МПа

$$\frac{dU_j}{dt} = \frac{dL_j}{dt} - \frac{dQ_j}{dt} \pm \frac{dm_j \cdot i_j}{dt} \pm \frac{dm_{\text{ум.уп}} \cdot i_j}{dt} \pm \frac{dm_{\text{ум.кл}} \cdot i_j}{dt} \quad (4)$$

Уравнение для определения массы газа, проходящей через клапаны в открытом

$$\frac{dm_j}{dt} = \alpha_j \cdot \varepsilon_j \cdot f_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_j \cdot \Delta P_j} \quad (5)$$

dU_j — изменение внутренней энергии газа, Дж; dQ_j — элементарный тепловой поток, К; dL_j — работа, совершенная над газом или самим газом, Дж; dm_j — изменение массы газа в рабочей камере, кг; i_j — энтальпия газа, Дж/кг; R — газовая постоянная, Дж/К·кг; ξ_j — коэффициент сжимаемости реального газа; V_j — объем газа, м³; $C_{v,j}$ — объемная теплоемкость газа, Дж/м³·К; m_j — масса газа в рабочей камере, кг; α_j — коэффициент расхода; ε_j — коэффициент расширения газа; ΔP_j — разность давлений газа до и после клапана или щели, Па; f_j — площадь проходного сечения в клапане, м²; ρ_j — плотность газа перед клапаном или щелью, кг/м³.

Результаты

На рис. 2, 3 представлены примеры результатов вычислений, направленные на определение эффективных режимных и конструктивных параметров поршневой воздушной ступени при следующих ограничениях: по температуре нагнетаемого газа $T_{\text{газа}} < 430$ К, коэффициенту подачи $\lambda \geq 0,6$, и индикаторному изотермическому КПД $\eta \geq 0,6$. Значение коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД приняты в соответствии с рекоменда-

циями, применяемыми при проектировании современных поршневых компрессоров [11].

Как показал анализ полученных результатов, представленных на рис. 2, 3, конструктивные и режимные параметры ступени по-разному влияют на интегральные характеристики. Так, увеличение диаметра цилиндра позволяет увеличить коэффициент подачи и изотермический КПД, но уменьшает эффективность внешнего охлаждения, что, в свою очередь, приводит к росту температуры. Увеличение хода поршня увеличивает значения всех рассматриваемых характеристик ступени. Время цикла, уменьшаемое до 2 с, приводит к росту температуры до критического значения — 430 К, однако при этом возрастает и коэффициент подачи с изотермическим КПД. Увеличение времени цикла более 4 с приводит к недопустимому росту утечек и снижению коэффициента подачи ниже 0,6. Таким образом была получена база данных в соответствии с обозначенными выше критериями.

Методика поиска рационального решения, основанная на симплекс-методе реализации в программе Microsoft Excel.

Из всей полученной базы данных исключены компрессорные ступени, не соответствующие мировым требованиям по значениям коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД (значения менее 0,6), а также ступени с недопустимо большой температурой нагнетаемого газа (более 430 К). Для большей наглядности выбраны наиболее лучшие решения. И на основании данного массива продемонстрирована работа программы.

Программа работает следующим образом: база данных поршневых ступеней заносится в Microsoft Excel с указанием интересующих параметров поршневой ступени.

Компрессор	Температура	Коэффициент подачи	КПД	Масса	Габариты	
Компрессор 1 D=0.05, S=0.5	400	0,66	0,65	5	0,001	1
Компрессор 2 D=0.05, S=0.8	395	0,73	0,77	8	0,0016	9
Компрессор 3 D=0.05, S=1	390	0,8	0,81	10	0,002	2
Компрессор 4 D=0.08, S=0.5	425	0,82	0,85	12,8	0,0026	8
Компрессор 5 D=0.08, S=0.8	418	0,9	0,88	20,5	0,0042	3
Компрессор 6 D=0.08, S=1	410	0,92	0,91	25,6	0,0053	4
Компрессор 7 D=0.1, S=0.5	430	0,88	0,89	15	0,0033	7
Компрессор 8 D=0.1, S=0.8	422	0,9	0,92	17	0,004	6
Компрессор 9 D=0.1, S=1.0	415	0,92	0,94	18	0,0045	5

Рис. 4. Результаты расчета с градацией по наибольшему значению целевой функции
Fig. 4. Calculation results with gradation according to the largest value of the objective function

Для каждого критерия задается значимость и диапазон значение величины критерия.

В данном случае расчет выполнен для следующих параметров: $P_n=6$ МПа, $V=0,002$ м³/с. При весе критериев — $a_T=0,2$; $a_\lambda=0,2$; $a_n=0,3$; $a_m=0,2$; $a_v=0,1$.

Программа выбирает наилучшее решение по максимальному значению функции (1) и выполняет ранжирование объектов в базе данных (рис. 4).

Таким образом, в результате получается градация поршневых компрессорных ступеней для реализации поставленной конкретной задачи. В полученных результатах наилучшая ступень учитывает влияние всех критериев с учетом их значимости в данном случае. Программа может быть использована в проектных организациях и в качестве инструмента для менеджеров продаж.

Выводы

В выполненной работе получен массив данных с характеристиками поршневых компрессорных ступеней.

Создана программа расчета наилучшего решения.

Программа апробирована на выборе соотношения конструктивных и режимных факторов из полученного массива данных.

Программа универсальна и может быть использована для поиска рационального решения для любых объектов, имеющих базу данных своих характеристик для различных конструктивных исполнений.

Список источников

1. Бусаров С. С., Юша В. Л. 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.
2. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure SingleStage Piston Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/S10556-017-0362-2.

3. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В. Экспериментальная оценка эффективности рабочих процессов тихоходных длинноходных поршневых компрессорных ступеней при сжатии различных газов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 8. С. 27–29.

4. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1971.

5. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с. ISBN 978-5-7996-2486-6.

6. Струченков В. И. Методы оптимизации: основы теории, задачи, обучающие компьютерные программы. Москва: Экзамен, 2005. 256 с.

7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / пер. с англ. И. Н. Быховской, Б. Т. Вавилова; под ред. М. Л. Быховского. Москва: Мир, 1975. 534 с.

8. Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. П. Методы оптимизации. Москва: Наука, 1978. 352 с.

9. Ногин В. Д., Протодяконов И. О., Евлампиев И. И. Основы теории оптимизации. Москва: Высшая школа, 1986. 383 с.

10. Гончаров В. А. Методы оптимизации. Москва: Юрайт, 2014. 191 с. ISBN 978-5-9916-1265-4; 978-5-9692-1179-7.

11. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд., доп. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.

12. Фотин Б. С. Рабочие процессы поршневых компрессоров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград: ЛПИ им. М. И. Калинина, 1974. 34 с.

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

14. Здалинский В. Б., Пирумов И. Б., Хрусталева Б. С. Статистическая оценка влияния клапанов на показатели эффективности поршневого компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 1994. № 3. С. 56–57.

15. Меренков Д. Ю. Совершенствование грибковых клапанов поршневых и мембранных микрокомпрессоров: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2004. 215 с.

16. Прилуцкий И. К. Совершенствование систем газораспределения компрессорных и расширительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 1997. 32 с.

17. Хрусталева Б. С. Математическое моделирование рабочих процессов в объемных компрессорах для решения задач

автоматизированного проектирования: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999. 31 с.

18. Юша В. Л., Бусаров С. С. Определение показателей политропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходовых 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.

БУСАРОВ Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

SPIN-код: 4141-3733

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

ВИННИКОВА Татьяна Александровна, кандидат филологических наук, доцент кафедры «Иностранные языки».

SPIN-код: 9230-0604

AuthorID (РИНЦ): 781067

ORCID: 0000-0001-5865-1023

AuthorID (SCOPUS): 57201982612

ResearcherID: D-4587-2015

СИНИЦИН Никита Глебович, студент гр. ТМО-182 нефтехимического института.

БАКУЛИН Константин Александрович, студент гр. ТМО-191 нефтехимического института.

Для цитирования

Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Винникова Т. А., Синицин Н. Г., Бакулин К. А. Метод поиска соотношения конструктивных и режимных факторов применительно к тихоходным компрессорным ступеням // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 23 – 29. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-23-29.

Статья поступила в редакцию 13.07.2021 г.

© С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Т. А. Винникова, Н. Г. Синицин, К. А. Бакулин

THE METHOD OF SEARCHING FOR THE RATIO OF DESIGN AND OPERATING FACTORS IN RELATION TO LOW-SPEED COMPRESSOR STAGES

S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, T. A. Vinnikova,
N. G. Sinitsin, K. A. Bakulin

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

The paper presents a methodology for finding the ratio of design and operating factors in relation to low-speed compressor stages. The technique is based on the simplex method, which allows you to choose from a database created on the basis of a well-known technique for calculating the working processes of low-speed compressor stages, the best solution for specific search criteria taking into account their importance. The technique is implemented in Microsoft Excel, an example of the implementation of the technique with five criteria is presented: temperature, flow rate, indicator efficiency, weight and overall dimensions.

Keywords: low-speed long-stroke compressor, workflow, optimization methods, search criteria, criteria weight, integral characteristics.

References

1. Busarov S. S., Yusha V. L. 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-tehnicheskiye 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.).
2. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure SingleStage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/S10556-017-0362-2. (In Engl.).
3. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V. Eksperimental'naya otsenka effektivnosti rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevykh kompressornykh stupeney pri szhatii razlichnykh gazov [Experimental estimation of the efficiency of work processes of slow-speed long-run compressor stages at compression of different gases] // *Khimicheskoe i neftegazovoye mashinostroyeniye. Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroyeniye*. 2018. No. 8. P. 27–29. (In Russ.).
4. Fedorov V. V. Teoriya optimal'nogo eksperimenta [Theory of optimal experiment]. Moscow, 1971. (In Russ.).
5. Yudin Yu. V., Maysuradze M. V., Vodolazskiy F. V. Organizatsiya i matematicheskoye planirovaniye eksperimenta [Organization and mathematical planning of the experiment]. Yekaterinburg, 2018. 124 p. ISBN 978-5-7996-2486-6. (In Russ.).
6. Struchenkov V. I. Metody optimizatsii: osnovy teorii, zadachi, obuchayushchiye komp'yuternyye programmy [Optimization methods: theory fundamentals, tasks, training computer programs]. Moscow, 2005. 256 p. (In Russ.).
7. Himmelblau D. Prikladnoye nelineynoye programmirovaniye [Applied nonlinear programming] / trans. from Engl. I. N. Bykhovskaya, B. T. Vavilov; Ed. M. L. Bykhovskiy. Moscow, 1975. 534 p. (In Russ.).
8. Moiseev N. N., Ivanilov Yu. P., Stolyarova E. P. Metody optimizatsii [Methods of optimization]. Moscow, 1978. 352 p. (In Russ.).
9. Nogin V. D., Protodyakonov I. O., Evlampiyev I. I. Osnovy teorii optimizatsii [Fundamentals of optimization theory]. Moscow, 1986. 383 p. (In Russ.).
10. Goncharov V. A. Metody optimizatsii [Optimization methods]. Moscow, 2014. 191 p. ISBN 978-5-9916-1265-4; 978-5-9692-1179-7. (In Russ.).
11. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3d ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
12. Fotin B. S. Rabochiye protsessy porshnevykh kompressorov [Working processes of piston compressors]. Leningrad, 1974. 34 p. (In Russ.).
13. Frenkel M. I. Porshnevyye kompressory. Teoriya, konstruksii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors. Theory, designs and design basics]. 3d ed. Leningrad, 1969. 744 p. (In Russ.).
14. Zdalinskiy V. B., Pirumov I. B., Khrustalev B. S. Statische otsenka vliyaniya klapanov na pokazateli effektivnosti porshnevykh kompressorov [Static assessment of the influence of valves on the efficiency of a piston compressor] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 1994. No. 3. P. 56–57. (In Russ.).
15. Merenkov D. Yu. Sovershenstvovaniye gribkovykh klapanov porshnevykh i membrannykh mikrokompressorov [Improvement of fungal valves of piston and membrane microcompressors]. Omsk, 2004. 215 p. (In Russ.).
16. Prilutskiy I. K. Sovershenstvovaniye sistem gazoraspredeleeniya kompressornykh i rasshiritel'nykh mashin [Improvement of gas distribution systems of compressor and expansion machines]. St. Petersburg, 1997. 32 p. (In Russ.).
17. Khrustalev B. S. Matematicheskoye modelirovaniye rabochikh protsessov v ob'yemnykh kompressorakh dlya resheniya zadach avtomatizirovannogo proyektirovaniya [Mathematical modeling of working processes in volumetric compressors for solving problems of computer-aided design]. St. Petersburg, 1999. 31 p. (In Russ.).
18. Yusha V. L., Busarov S. S. Opredeleeniye pokazateley politropy skhematizirovannykh rabochikh protsessov vozdukhnykh porshnevykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh

stupeney [Determination of polytropic indicators of schematized working processes of air piston slow-moving long-stroke compressor stages] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-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.).

BUSAROV Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

SPIN-code: 4141-3733

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Correspondence address: bssi1980@mail.ru

NEDOVENCHANY Aleksey Vasilievich, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Correspondence address: lonewolf_rus88@mail.ru

VINNIKOVA Tatyana Aleksandrovna, Candidate of Philology, Associate Professor of Foreign Languages Department.

SPIN-code: 9230-0604

AuthorID (RSCI): 781067

ORCID: 0000-0001-5865-1023

AuthorID (SCOPUS): 57201982612

ResearcherID: D-4587-2015

SINITSIN Nikita Glebovich, student gr. TMO-182 of Petrochemical Institute.

BAKULIN Konstantin Alexandrovich, student gr. TMO-191 of Petrochemical Institute.

For citations

Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Vinnikova T. A., Sinitsin N. G., Bakulin K. A. The method of searching for the ratio of design and operating factors in relation to low-speed compressor stages // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 23–29. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-23-29.

Received July 13, 2021.

© S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, T. A. Vinnikova, N. G. Sinitsin, K. A. Bakulin