

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛИТРОПЫ СХЕМАТИЗИРОВАННЫХ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУШНЫХ ПОРШНЕВЫХ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

В. Л. Юша, С. С. Бусаров

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

Экспериментальные исследования тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней на примере рабочего тела — воздух позволили определить такие параметры схематизированного рабочего процесса, как политропы сжатия и обратного расширения. Данные параметры, во-первых, могут быть использованы при инженерных методиках расчёта или моделях первого уровня, а во-вторых, позволяют выполнить уточнение существующей методики расчёта поршневых ступеней в части определения объёмного коэффициента. На основании проведённого анализа были получены рекомендации по определению эквивалентных политроп и политроп конечных параметров. Полученные значения значительно отличаются от принятых в настоящее время для быстроходных компрессорных схем.

Ключевые слова: тихоходная длинноходовая ступень, показатель политропы, экспериментальные исследования, схематизация рабочего процесса, индикаторная диаграмма.

Введение

Накопленный объём теоретических и экспериментальных результатов по исследованию рабочих процессов тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней привели к необходимости разработки уточнённой методики расчёта поршневой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени на основе принципа схематизации [1, 2]. В данной работе рассмотрен вопрос об уточнении методики расчёта коэффициентов политропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней на основании экспериментально полученных данных.

Описание изменения параметров газа в рабочей камере выполняют одним из известных трёх способов: на основании схематизации политропного процесса при $n = const$, на основании уравнений сохранения энергии и массы для расчётной схемы с сосредоточенными параметрами, на основании расчётной схемы с распределёнными параметрами [3, 4].

Для конструкторских и проектировочных расчётов, в которых определяют индикаторную мощность и производительность, обычно используют первый метод, когда считают, что процесс сжатия и расширения можно описать политропами с постоянными показателями. Причём для определения индикаторной мощности действительные процессы сжатия и расширения могут быть заменены эквивалентными политропными процессами на основании метода получения равноценных площадей средней части индикаторной диаграммы, полученной экспериментально,

а для определения производительности используют так называемые политропы конечных параметров [1, 2, 5].

В силу существенного различия режимных и конструктивных параметров тихоходных ступеней сжатия и существующих быстроходных компрессорных агрегатов можно предположить, что политропы сжатия и обратного расширения также будут определяться по различным зависимостям.

Постановка задачи

Объектом экспериментального исследования является ступень длинноходового тихоходного поршневого компрессора без подачи смазки в проточную часть. Схема ступени представлена на рис. 1. Поршень 1 приводится в движение через шток 2 от штока гидроцилиндра, который, в свою очередь, приводится в действие от гидроаккумуляторной станции. Поршневые уплотнения 3 выполнены из самосмазывающегося материала. Клапаны всасывания и нагнетания расположены в клапанной плите и условно не показаны. Экспериментальная ступень выполнена с диаметром цилиндра — 0,05 м и ходом поршня — 0,5 м; внешнее охлаждение цилиндра — водяное, температура воды — 290 К; сжимаемые газы — воздух; температура всасываемого газа — 290 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — до 10,0 МПа.

Для проведения экспериментальных исследований разработан экспериментальный стенд с линейным (гидравлическим) приводом [6–8]. Экспериментальные исследования рабочих про-

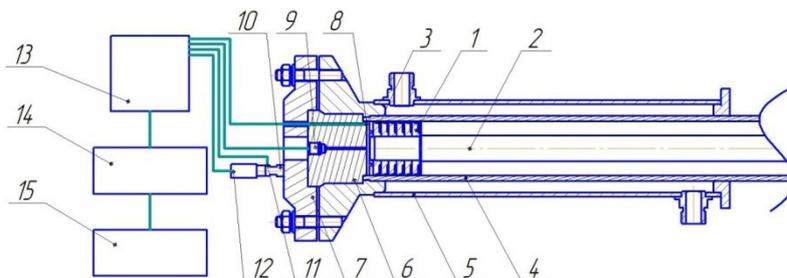


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной ступени:
 1 — поршень; 2 — шток; 3 — манжетные уплотнения; 4 — цилиндр;
 5 — рубашка охлаждения; 6 — плита; 7 — крышка-фланец;
 8, 11 — датчик температуры; 9 — датчик давления;
 10 — нагнетательный штуцер; 12 — датчик расхода;
 13 — усилитель сигнала; 14 — цифровой запоминающий осциллограф;
 15 — персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stage:
 1 — piston; 2 — stock; 3 — lip seals; 4 — cylinder; 5 — cooling shirt;
 6 — plate; 7 — flange cover; 8, 11 — temperature sensor;
 9 — pressure sensor; 10 — discharge fitting; 12 — flow sensor;
 13 — signal amplifier; 14 — a digital storage oscilloscope;
 15 — personal computer



Рис. 2. Фотография второго модуля гидроцилиндр-компрессорного узла с установленной измерительной системой:

1 — силовой гидроцилиндр;
 2 — ступень поршневого компрессора; 3 — ресивер;
 4 — циркуляционный насос системы охлаждения ступени;
 5 — бак охлаждающей жидкости; 6 — элементы система контроля пространственного положения поршня в течение рабочего цикла;
 7 — система контроля мгновенных и интегральных параметров рабочего газа

Fig. 2. Picture of the second module of the hydraulic cylinder-compressor unit with the installed measuring system:

1 — power hydraulic cylinder; 2 — stage piston compressor;
 3 — receiver; 4 — circulation pump of the stage cooling system;
 5 — a tank of a cooling liquid; 6 — elements of the control system of the spatial position of the piston during the working cycle;
 7 — monitoring system of instantaneous and integral parameters of the working gas

цессов ступени включают в себя измерение мгновенных параметров состояния рабочего газа в цилиндре и её интегральных характеристик.

Теория

Для измерения быстроизменяющегося давления газа в рабочей камере ступени использо-

вались кремниевые датчики давления 9 (рис. 1) типа Д16 [9]. Измерение температуры было выполнено термисторами 8, 11 (рис. 1) с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления [10, 11].

Действительный расход газа на нагнетании ступени определялся датчиком расхода 12 (рис. 1) типа АWM720P1. Данные с датчика температуры,

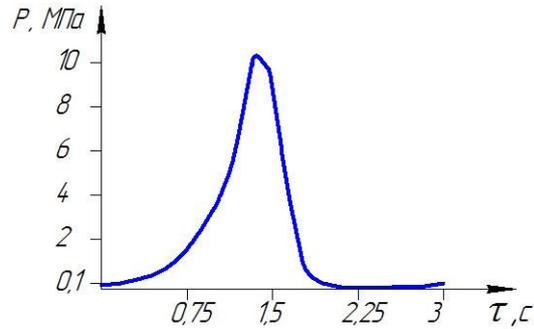
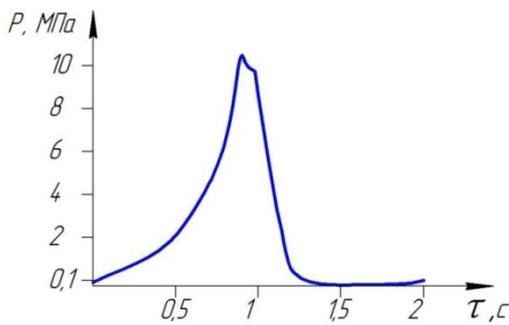


Рис. 3. Изменение мгновенного давления в рабочей камере за время цикла
Fig. 3. The change in instantaneous pressure in the working chamber during the cycle

датчика давления и датчика расхода поступают на цифровой осциллограф 14 через усилитель 13 и персональный компьютер 15. Приборная погрешность измерения температуры, давления и расхода представлена ниже. Фотография стенда представлена на рис. 2.

Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора составила 3,2% [12]:

$$\delta_0 = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_t^2}, \quad (1)$$

где δ_I — погрешность осциллографа, определяемая погрешностью прибора, 3%; δ_t — погрешность термометра, определяемая погрешностью прибора, 1%.

Определим приборную погрешность при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [13–16]:

$$\delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{MH}^2 + \delta_0^2}, \quad (2)$$

где δ_A — относительная погрешность датчика давления, %; δ_{MH} — относительная погрешность образцового манометра, %; δ_0 — относительная погрешность осциллографа, %.

Относительная погрешность датчика давления по паспорту $\delta_A = 1,4\%$. Относительная погрешность образцового манометра $\delta_{MH} = 1,5\%$. Относительная погрешность для осциллографа определяется паспортом $\delta_0 = 3\%$. Тогда общая погрешность датчика давления равна:

$$\delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{3^2 + 1,5^2 + 1,4^2} = 3,63\%.$$

Расход воздуха измеряется тепловым датчиком расхода AWM720P1 с собственной погрешностью $\delta_{VD} = 0,3\%$. Тогда общая погрешность измерения расхода определяется по формуле:

$$\delta_V = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{VD}^2} = \sqrt{3^2 + 0,3^2} = 3,02\%.$$

Используя существующую методику расчёта [1, 17], получаем:

$$\lambda_0 = 1 - a_m \left(\left(\frac{P_H}{P_{BC}} \right)^{1/m} - 1 \right), \quad (3)$$

где P_{BC} — давление всасывания, Па; P_H — давление нагнетания, Па; m — коэффициент поли-

тропы; a_m — величина относительного мёртвого объёма.

Данная формула является простой, поскольку она содержит только начальные и конечные параметры рабочего тела, которые, естественно, известны из условий работы компрессора.

Показатели политропы сжатия и обратного расширения определяются по экспериментальной индикаторной диаграмме.

Результаты экспериментов

На рис. 3–6 представлены экспериментальные данные по температурному режиму работы ступени, коэффициенту подачи и изотермическому КПД и индикаторные диаграммы.

На рис. 7 представлена схематизация, основанная на равенстве площадей действительной и схематизированной индикаторной диаграммы, для одного из режимов работы ступени.

Политропа (n_c), проведённая из точки 1, имеющая постоянную величину показателя и заключающая площадь 1-2-a-b-1, равную площади, заключённой действительной кривой процесса сжатия 1'-2'-a-b-1', называется эквивалентной политропой процесса сжатия [1].

Политропа (n_p), проведённая из точки 3, имеющая постоянную величину показателя и заключающая площадь 3-a-b-4, равную площади, заключённой действительной кривой процесса обратного расширения 3'-a-b-4', называется эквивалентной политропой процесса обратного расширения [1].

Обсуждение экспериментов

Проведя анализ полученных результатов для рассматриваемых конструктивных и режимных параметров и учитывая методику, изложенную в работе [1], с погрешностью до 5% возможно дать следующие рекомендации для определения коэффициентов политропы при расчёте энергетических параметров поршневой ступени с учётом коэффициента политропы — k :

$$n_c = (0,77...0,82)k, \quad (5)$$

$$n_p = (0,93...0,95)n_c. \quad (6)$$

Таким образом, для тихоходных длинноходных компрессорных ступеней

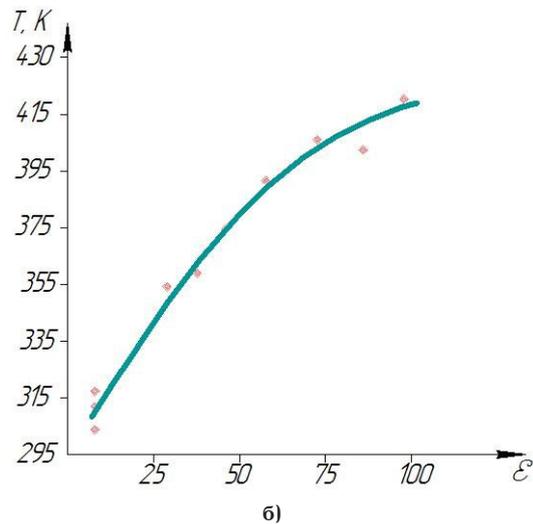
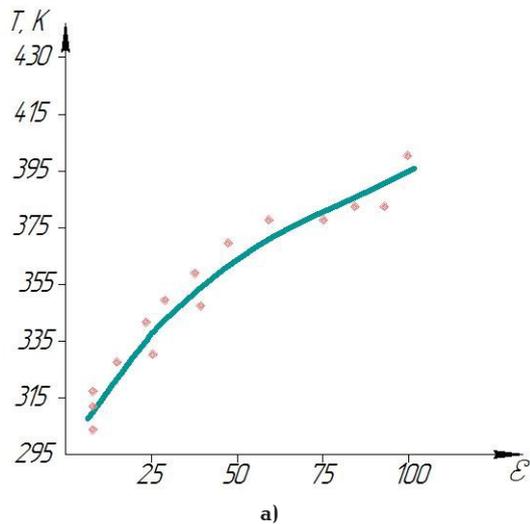


Рис. 4. Зависимость средней температуры нагнетаемого газа от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м при времени цикла:
 а) $\tau = 3$ с; б) $\tau = 2$ с
 Fig. 4. The dependence of the average temperature of the injected gas on the degree of pressure increase during intensive external cooling of the cylinder $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м at cycle time:
 а) $\tau = 3$ s; б) $\tau = 2$ s

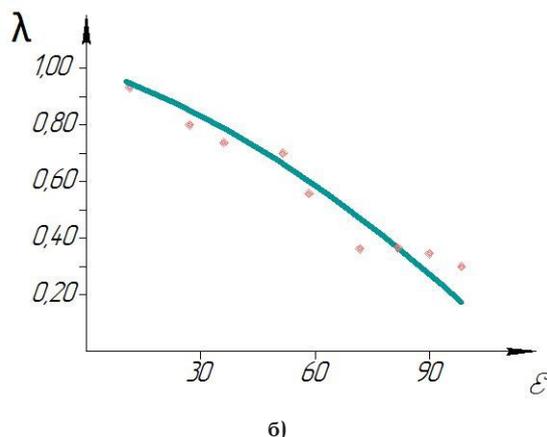
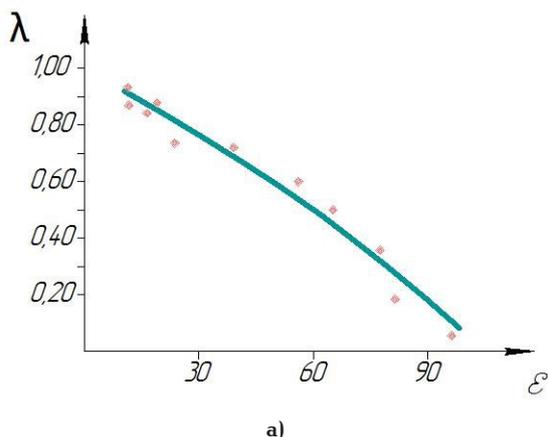


Рис. 5. Зависимость коэффициента подачи от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м при времени цикла:
 а) $\tau = 3$ с; б) $\tau = 2$ с
 Fig. 5. The dependence of the supply coefficient on the degree of pressure increase during intensive external cooling of the cylinder $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м at cycle time:
 а) $\tau = 3$ s; б) $\tau = 2$ s

$$n_c = 1,08...1,15 \text{ и } n_p = 1,04...1,09.$$

Для классической же теории [1], принятой для быстроходных поршневых компрессоров, коэффициенты эквивалентных политроп имеют более высокие значения:

$$n_c = (0,92...0,98)k, \quad (7)$$

$$n_p = (0,94...0,98)n_c. \quad (8)$$

Сравнительный анализ показывает принципиальное различие рабочих процессов тихоходных ступеней, которые близки к изотермическому, тогда как рабочие процессы быстроходных поршневых компрессоров близки к адиабатным.

При расчёте объёмного коэффициента, необходимого для определения производительности компрессора, применяется так называемая схема по политропе конечных параметров (процесс 3-4 рис. 8).

Политропами конечных параметров называют условные политропические зависимости с постоянным показателем, начальные и конечные параметры которых совпадают с действительными [1]. Зная, согласно экспериментальным данным, параметры процессов в начале и конце (для сжатия и обратного расширения) подбираем постоянные показатели политроп, чтобы совпадение параметров удовлетворяло погрешности не более 5%.

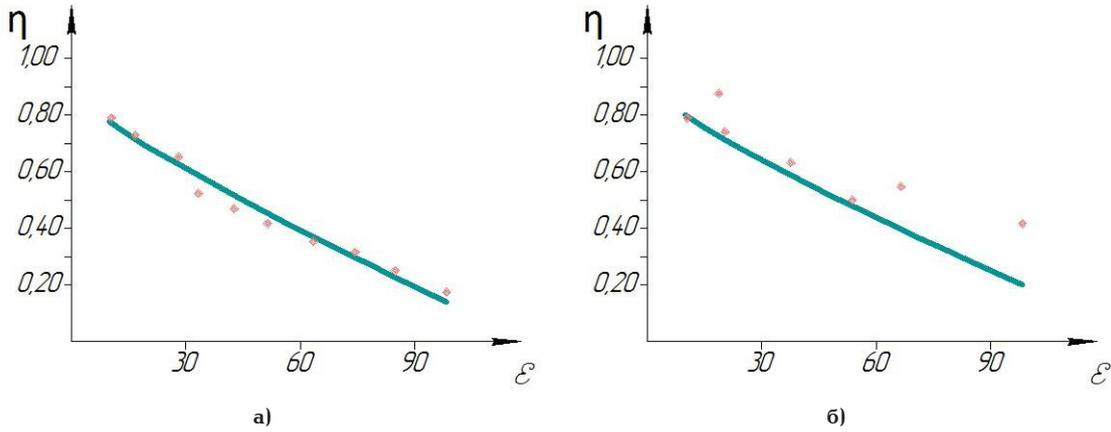


Рис. 6. Зависимость изотермического КПД от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м при времени цикла:
 а) $\tau = 3$ с; б) $\tau = 2$ с
Fig. 6. The dependence of the isothermal efficiency on the degree of pressure increase during intensive external cooling of the cylinder $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м at cycle time:
 а) $\tau = 3$ s; б) $\tau = 2$ s

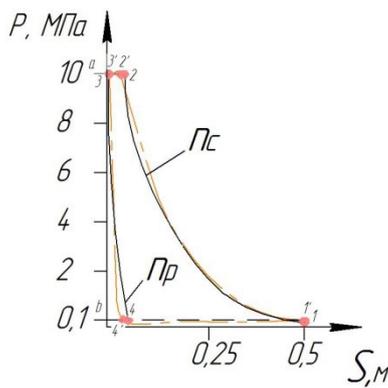


Рис. 7. Пример схематизации рабочего процесса по эквивалентным политропам при $P_{BC} = 0,1$ МПа; $P_H = 10$ МПа; $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м; $\tau = 3$ с
Fig. 7. An example of the schematization of the workflow by equivalent polytropes at $P_{BC} = 0,1$ МПа; $P_H = 10$ МПа; $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м; $\tau = 3$ s

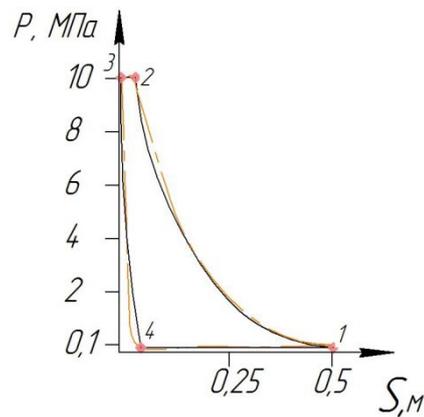


Рис. 8. Пример схематизации по политропе конечных параметров при $P_{BC} = 0,1$ МПа; $P_H = 10$ МПа; $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м; $\tau = 3$ с
Fig. 8. An example of schematization of the final parameters by polytropic at $P_{BC} = 0,1$ МПа; $P_H = 10$ МПа; $D_{ц} = 0,05$ м; $S = 0,5$ м; $\tau = 3$ s

Проведя анализ полученных результатов для рассматриваемых конструктивных и режимных параметров и учитывая методику, изложенную в работе [1] с погрешностью до 5%, возможно дать следующие рекомендации для расчётов коэффициентов политропы конечных параметров по известной формуле [1, 2]:

$$m = 1 + A(k - 1), \quad (9)$$

где A — коэффициент, который для рассматриваемой области давлений нагнетания можно принять: для $P_H \leq 5$ МПа — $A = 0,125$ и $m \approx 1,05$; для $5 \text{ МПа} < P_H \leq 10 \text{ МПа}$ — $A = 0,25$ и $m \approx 1,1$.

Для классической же теории [1] коэффициент политропы конечных параметров: при $P_H < 3$ МПа — лежит в диапазоне 1,2...1,4, при $P_H > 3$ МПа принимается равным 1,4.

Выводы и заключение

Проведённые экспериментальные исследования позволили сделать первый шаг по уточнению существующей методики расчёта поршневых компрессорных ступеней.

Определение коэффициентов политропы показало актуальность поставленной задачи, поскольку полученные результаты для тихоходных

компрессорных ступеней значительно отличаются от принятых зависимостей для быстроходных ступеней, и вносит значительное различие между существующей методикой расчёта и вновь создаваемой.

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение полного коэффициента подачи, распределения давления между ступенями, получения зависимости для суммарной поршневой силы, что позволит создать методику расчёта поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней и агрегатов.

Список источников

1. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. 3-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.
2. Фотин Б. С. Рабочие процессы поршневых компрессоров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ им М. И. Калинина, 1974. 34 с.
3. Юша В. Л. Системы охлаждения и газораспределения объёмных компрессоров: моногр. Новосибирск: Наука, 2006. 236 с.
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.
5. Chrustalev B. S., Zdalinsky V. B., Bulanov V. P. A Mathematical model of reciprocating compressor with one or several stages for the real gases // *International Compressor Engineering Conference*. 1996. 1108. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108> (дата обращения: 15.11.2019).
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchanyi A. V., Sazhin B. S., Chizhikov M. A., Busarov I. S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor // *International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706.
7. Юша В. Л., Бусаров С. С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.
8. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.
9. Федяков Е. М., Колтаков В. К., Богдатыев Е. Е. Измерение переменных давлений. М.: Изд-во стандартов, 1982. 216 с.
10. Дубровский В. В. Резисторы: справ. / под ред. И. И. Четверкова, В. М. Терехова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
11. Зайцев Ю. В., Громов В. С., Григораш Т. С. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи. М.: Радио и связь, 1985. 120 с.
12. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
13. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.
14. Грановский В. С., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
15. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 96 с.
16. Cochran W. G. *Errors of Measurement in Statistics // Technometrics*. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. DOI: 10.2307/1267450.
17. Бусаров С. С., Гошля Р. Ю., Громов А. Ю., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Титов Д. С. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора // *Компрессорная техника и пневматика*. 2016. № 6. С. 6–10.

ЮША Владимир Леонидович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Холодильная и компрессорная техника и технология», декан нефтехимического института.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

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

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: habr86@mail.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 25.12.2019 г.

© В. Л. Юша, С. С. Бусаров

DETERMINATION OF POLYTROPIC INDICATORS OF SCHEMATIZED WORKING PROCESSES OF AIR PISTON SLOW-MOVING LONG-STROKE COMPRESSOR STAGES

V. L. Yusha, S. S. Busarov

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

Experimental studies of low-speed long-stroke compressor stages using the example of working fluid — air made it possible to determine such parameters of a schematized working process as polytropes of compression and reverse expansion. These parameters, firstly, can be used in engineering methods of calculation or first-level models, and secondly, they will make it possible to refine the existing methodology for calculating piston stages in terms of determining the volume factor. Based on the analysis, recommendations are given on determination of equivalent polytropes and polytropes of finite parameters. The values obtained are significantly different from those currently accepted for high-speed compressor circuits.

Keywords: low-speed long-stroke stage, polytropic indicator, experimental studies, schematization of the working process, indicator diagram.

References

1. Plastinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston Compressors. In 2 vol. Vol. 1. Theory and Calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
2. Fotin B. S. Rabochiye protsessy porshnevnykh kompressorov [Work processes of piston compressors]. Leningrad, 1974. 34 p. (In Russ.).
3. Yusha V. L. Sistemy okhlazhdeniya i gazoraspredeleniya ob'yemnykh kompressorov [Volumetric compressor cooling and gas distribution systems]. Novosibirsk, 2006. 236 p. (In Russ.).
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2. (In Engl.).
5. Chrustalev B. S.; Zdalinsky V. B., Bulanov V. P. A Mathematical model of reciprocating compressor with one or several stages for the real gases // *International Compressor Engineering Conference*. 1996. 1108. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108> (accessed: 15.11.2019). (In Engl.).
6. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchanyi A. V., Sazhin B. S., Chizhikov M. A., Busarov I. S. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor // *International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2016. AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706. (In Engl.).
7. Yusha V. L., Busarov S. S. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifikirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and high pressures based on unified low-speed long-stroke stages] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.
8. Frenkel' M. I. Porshnevyye kompressory: teoriya, konstruktzii i osnovy proyektirovaniya [Piston compressors: theory, design, and design basics]. 3rd ed. Leningrad, 1969. 744 p. (In Russ.).
9. Fedyakov Ye. M., Koltakov V. K., Bogdat'yev Ye. Ye. Izmereniye peremennykh davleniy [Pressure measurement]. Moscow, 1982. 216 p. (In Russ.).
10. Dubrovskiy V. V. Reziistory: sprav. [Resistors: Handbook] / Ed. I. I. Chetverkov, V. M. Terekhov. 2nd ed. Moscow, 1991. 528 p. (In Russ.).
11. Zaytsev Yu. V., Gromov V. S., Grigorash T. S. Poluprovodnikovyye termoelektricheskiye preobrazovateli [Semiconductor Thermoelectric Converters]. Moscow, 1985. 120 p. (In Russ.).
12. Kassandrova O. N., Lebedev V. V. Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya [Processing Observation Results]. Moscow, 1970. 104 p. (In Russ.).
13. Zaydel' A. N. Pogreshnosti izmereniya fizicheskikh velichin [Errors of measurement of physical quantities]. Leningrad, 1985. 112 p. (In Russ.).
14. Granovskiy V. S., Siraya T. N. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniyakh [Methods for processing experimental data during measurements]. Leningrad, 1990. 288 p. (In Russ.).
15. Zaydel' A. N. Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy [Elementary estimates of measurement errors]. Leningrad, 1968. 96 p. (In Russ.).
16. Cochran W. G. Errors of Measurement in Statistics // *Technometrics*. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. DOI: 10.2307/1267450. (In Engl.).
17. Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Gromov A. Yu., Nedovenchanyy A. V., Busarov I. S., Titov D. S. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov teploobmena v rabochey kamere tikhokhodnoy stupeni porshnevogo kompressa [Mathematical modeling of heat transfer processes in the working chamber of the slow-speed piston compressor

stage] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Engineering and Pneumatics*. 2016. No. 6. P. 6–10. (In Russ.).

AuthorID (RSCI): 610336
AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Address for correspondence: habr86@mail.ru

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, Dean of Petrochemical Department.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

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

For citations

Yusha V. L., Busarov S. S. Determination of polytropic indicators of schematized working processes of air piston slow-moving long-stroke compressor stages // *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.

Received December 25, 2019.

© V. L. Yusha, S. S. Busarov