

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ САМОДЕЙСТВУЮЩИХ КЛАПАНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

И. С. Бусаров, С. С. Бусаров, В. Л. Юша

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

Представлены результаты исследования влияния изменения площади проходного сечения в седле самодельствующих клапанов с эластомерными элементами на характеристики тихоходных компрессорных ступеней. Разработаны методика экспериментального исследования тихоходных компрессорных ступеней с возможностью получения мгновенных параметров состояния газа в рабочей камере ступени и ее интегральных характеристик и экспериментальный стенд для ее реализации. Результаты сравнительных экспериментальных исследований подтвердили эффективность конструкции клапана с изменяемой площадью проходного сечения седла по сравнению с известными конструкциями — увеличение коэффициента подачи и изотермического индикаторного КПД составило не менее 10...15 %.

Ключевые слова: компрессорная тихоходная ступень, экспериментальные исследования, рабочие процессы, самодельствующий клапан, эластомерное седло.

Введение

Получение высоких давлений нагнетаемого газа (более 10,0 МПа) в одной ступени до настоящего времени не удавалось осуществить в классических быстросходных схемах поршневых компрессорных агрегатов. Связано это с двумя основными причинами:

— ограничения по температуре газа до 454 К приводят к возможности получения максимальной степени повышения давления не более 5 [1, 2];

— влияние мертвого объема не позволяет по данным источника [2] получить степень повышения давления более 50...70.

Решение данных проблем за счет применения многоступенчатых поршневых и мембранных компрессоров в настоящее время позволяет успешно получать высокие давления нагнетаемого газа.

Проведенные исследования группой авторов кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ позволили создать конструкцию тихоходной поршневой ступени, в которой сочетание режимов работы и конструктивных особенностей рабочей камеры позволили решить обозначенные выше проблемы при сжатии газа в одной ступени.

Во-первых, вытянутая форма цилиндрической части рабочей камеры с параметром $S/D > 10$ позволила минимизировать влияние мертвого объема [3, 4].

Во-вторых, режим работы, при котором время рабочего цикла составляет 2...4 с, позволяет наряду с интенсивным внешним охлаждением ступени эффективно охлаждать газ в процессе его сжатия [3, 5].

Данные особенности компрессорной ступени позволили получить давление более 10 МПа. Однако в процессе исследований был выявлен большой недостаток таких компрессорных ступеней — чувстви-

тельность к герметичности клапанов в закрытом состоянии, обуславливающая значительные утечки газа из рабочей камеры [6, 7].

В связи с этим одной из актуальных задач совершенствования рабочих процессов тихоходных компрессоров стала разработка конструкций самодельствующих клапанов с улучшенной герметичностью. Направлением улучшения конструкции клапанов было выбрано использование эластомеров в качестве уплотняющих элементов. Данная задача остается актуальной и в настоящее время.

В данной работе представлена конструкция клапана с седлом, контактная поверхность которого выполнена из эластомерного элемента с возможностью уменьшения периметра соприкосновения запорного органа и седла в закрытом состоянии по сравнению с диаметром проходного сечения в седле. Проведены экспериментальные исследования с использованием данного клапана, получены интегральные характеристики поршневой тихоходной ступени и осуществлено сравнение полученных результатов с полученными ранее.

Постановка задачи

Объектом исследования является тихоходная ступень со следующими параметрами: геометрические — диаметр цилиндра 0,05 м; ход поршня — 0,2...0,5 м; граничные условия — температура газа на всасывании 290 К, давление всасывания 0,1 МПа, давление нагнетания до 10 МПа; температура охлаждающей среды 290 К, физические условия: сжимаемый газ — воздух.

Эластомерный элемент является элементом седла и имеет форму конуса. Во время посадки запорного органа на седло конус сжимается, при этом уменьша-

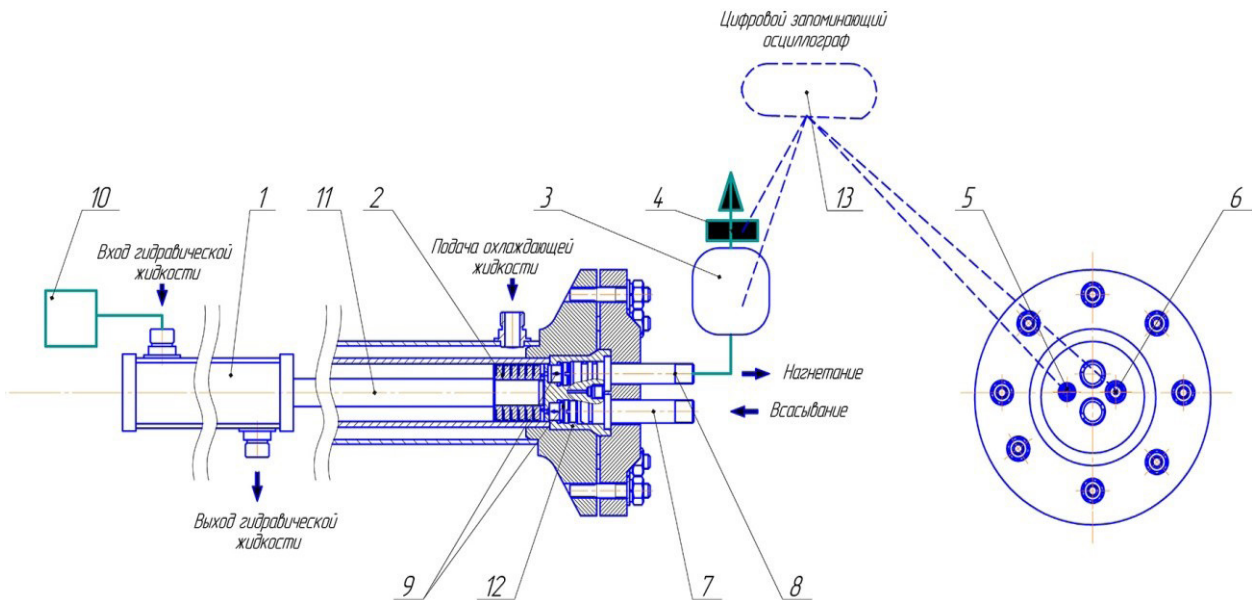


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной ступени:

- 1 — гидравлический цилиндр; 2 — уплотнение; 3 — ресивер; 4 — датчик расхода; 5 — датчик температуры;
 6 — датчик давления; 7 — штуцер всасывания; 8 — штуцер нагнетания; 9 — клапаны всасывания и нагнетания;
 10 — гидростанция; 11 — шток; 12 — клапанная плита; 13 — цифровой запоминающий осциллограф

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stage:

- 1 — hydraulic cylinder; 2 — seal; 3 — receiver; 4 — flow sensor; 5 — temperature sensor; 6 — pressure sensor; 7 — suction fitting;
 8 — discharge fitting; 9 — suction and discharge valves; 10 — hydroelectric power station; 11 — rod;
 12 — valve plate; 13 — digital storage oscilloscope



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда

Fig. 2. General view of the experimental stand

ется периметр прилегания запорного органа к седлу в закрытом состоянии.

Теория

Объектом экспериментального исследования является бесшмазочная ступень тихоходного длинноходового поршневого компрессора. На рис. 1 представлены схема ступени и сбор изменяющихся параметров в рабочей камере. Гидростанция 10 приводит в действие гидроцилиндр 1, который жестко связан со штоком 11, на котором установлен поршень с уплотнениями из самосмазывающихся материалов 2. Во втулке 12 установлены клапаны всасывания и

нагнетания 9. Сбор изменяющихся параметров осуществляется цифровым запоминающим осциллографом 13. Для фиксации температуры и давления в рабочей камере установлены датчики 5 и 6 соответственно.

Для проведения экспериментальных исследований разработан экспериментальный стенд с линейным (гидравлическим) приводом (рис. 2).

Для измерения быстроизменяющегося давления газа в рабочей камере ступени использовались кремниевые датчики давления типа Д16 [8].

Определим приборную погрешность при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [9–13]:

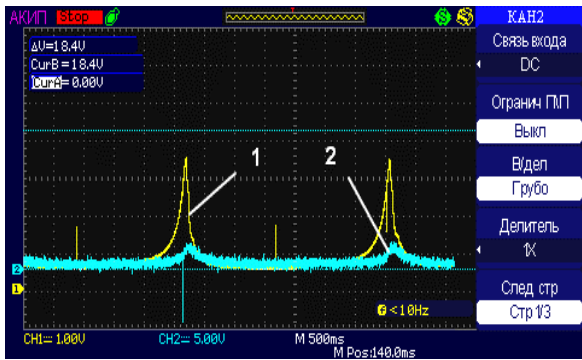


Рис. 3. Изменение мгновенных параметров сжимаемого газа в рабочей камере: $P_{ac} = 0,1$ МПа, $P_n = 9,0$ МПа, $\tau = 4$ с: 1 — мгновенное давление; 2 — мгновенная температура
 Fig. 3. Change of instantaneous parameters of the compressed gas in the working chamber: $P_{suc} = 0,1$ МПа, $P_{dis} = 9,0$ МПа, $\tau = 4$ с: 1 — instantaneous pressure; 2 — instantaneous temperature

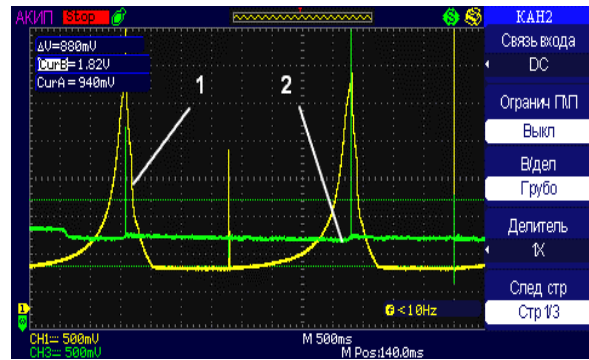


Рис. 4. Расход газа и изменение мгновенных параметров сжимаемого газа в рабочей камере: $P_{ac} = 0,1$ МПа, $P_n = 10,0$ МПа, $\tau = 2$ с: 1 — мгновенное давление; 2 — расход газа
 Fig. 4. Gas flow rate and change of instantaneous parameters of the compressed gas in the working chamber: $P_{suc} = 0,1$ МПа, $P_{dis} = 10,0$ МПа, $\tau = 2$ с: 1 — instantaneous pressure; 2 — instantaneous temperature

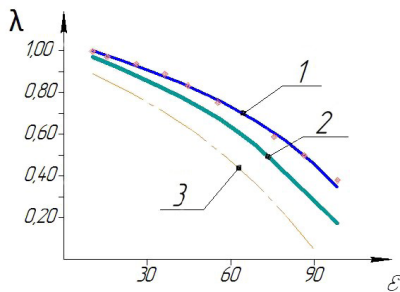


Рис. 5. Зависимость коэффициента подачи от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра для времени цикла 2 с: 1 — клапан А; 2 — клапан В; 3 — клапан С
 Fig. 5. The dependence of the feed coefficient on the degree of pressure increase during intensive external cooling of the cylinder for a cycle time of 2 s: 1 — valve A; 2 — valve B; 3 — valve C

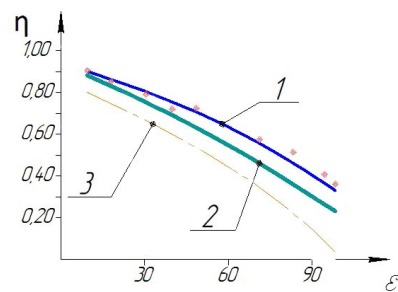


Рис. 6. Зависимость индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра для времени цикла 2 с: 1 — клапан А; 2 — клапан В; 3 — клапан С
 Fig. 6. Dependence of the indicator isothermal efficiency on the degree of pressure increase during intensive external cooling of the cylinder for a cycle time of 2 s: 1 — valve A; 2 — valve B; 3 — valve C

$$\delta_{AA} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{MH}^2 + \delta_0^2}, \quad (1)$$

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:

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

Определим общую погрешность датчика температуры на основании бусинкового термистора [12]:

$$\delta_T = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_t^2 + \delta_V^2 + \delta_F^2}, \quad (2)$$

где δ_M — относительная погрешность осциллографа, 0,05%; δ_t — погрешность термометра, определяемая погрешностью прибора, 0,1%; δ_V — погрешность вольтметра, определяемая погрешностью прибора, 0,3%; δ_F — погрешность расчета по полученной интерполированной формуле, 1,5%.

$$\delta_T = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2 + 0,3^2 + 1,5^2} = 1,53 \text{ \%}.$$

Для измерения расхода применялся датчик типа AWM720P1 фирмы «Honeywell». Достоинством данного датчика является выходной цифровой сигнал, позволяющий подключать его к современным ПК и осциллографам, а также заводская выходная характеристика для различных газов. Погрешность данного датчика составляет 2%.

Результаты экспериментов

На рис. 3, 4 представлены экспериментальные диаграммы изменения параметров состояния рабочего газа за время рабочего процесса тихоходной компрессорной ступени с самодействующим клапаном, содержащим эластомерный элемент.

По результатам проведенного эксперимента были получены зависимости коэффициента подачи индикаторного изотермического КПД в зависимости от степени повышения давления [14] — рис. 5, 6. На этих рисунках представлены результаты сравнительных исследований клапана с эластомерным седлом и изменяемой величиной площади проходного сечения седла (А); клапана с эластомерным седлом и неизменяемой величиной площади проходного се-

чения седла [14] (В); клапана с металлическим седлом и неизменяемой величиной площади проходного сечения седла [15] (С).

Сравнительный анализ результатов испытаний нового клапана с эластомерным элементом и результатов, полученных ранее и представленных в работах [15, 14, 16, 5], показал улучшение интегральных характеристик компрессорной ступени, например, для коэффициента подачи увеличение составило до 10% и 30%, для изотермического индикаторного КПД — до 12% и 35% по сравнению с клапаном, имеющим седло, выполненное из эластомерного элемента [14] и металлического клапана [15] соответственно.

Выводы и заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования рабочего процесса тихоходной компрессорной ступени с новым клапаном с эластомерным седлом, позволяющим уменьшать периметр соприкосновения запорного органа и седла в закрытом состоянии клапана, показали улучшение интегральных характеристик: коэффициента подачи на 10% и 30%, для изотермического индикаторного КПД — до 12% и 35% по сравнению с клапаном, имеющим седло, выполненное из эластомерного элемента [14] и металлического клапана [15] соответственно. Дальнейшие исследования будут направлены на создание верифицированной методики расчета с учетом работы самодействующих клапанов тихоходных длинноходовых компрессорных агрегатов, а также определение ресурса таких клапанов.

Список источников

1. Бэр Г. Д. Техническая термодинамика. Москва: Мир, 1977. 518 с.
2. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.
3. Бусаров С. С., Юша В. Л. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.
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. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Гошля Р. Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесмасляных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18.
6. Титов Д. С., Бусаров И. С., Бусаров С. С. Исследование влияния неплотностей рабочей камеры на рабочий процесс сверхтихоходных длинноходовых поршневых компрессорных и насосных агрегатов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 6. С. 25–27.
7. Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Busarov I. S., Nedovenchanij A. V. Experimental determination of the conventional clearance

in valves of oil-free reciprocating compressor units // International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2017. 2017. Vol. 1876 (1). 020043. DOI: 10.1063/1.4998863.

8. Федяков Е. М., Колтаков В. К., Богдатыев Е. Е. Измерение переменных давлений. Москва: Изд-во стандартов, 1982. 216 с.
9. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. Москва: Наука, 1970. 104 с.
10. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.
11. Грановский В. С., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 288 с. ISBN 5-283-04480-7.
12. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Ленинград: Наука, 1968. 96 с.
13. Cochran W. G. Errors of Measurement in Statistics // Technometrics. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. DOI: 10.2307/1267450.
14. Недовенчаный А. В. Повышение энергетической и динамической эффективности поршневого малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидрприводом: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 232 с.
15. Громов А. Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 213 с.
16. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchanij 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. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.07.706.

БУСАРОВ Игорь Сергеевич, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

SPIN-код: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Адрес для переписки: habr86@mail.ru

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

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

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

Для цитирования

Бусаров И. С., Бусаров С. С., Юша В. Л. Влияние деформации проточной части эластомерных элементов самодействующих клапанов на характеристики тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 4. С. 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38.

Статья поступила в редакцию 20.09.2021 г.

© И. С. Бусаров, С. С. Бусаров, В. Л. Юша

THE EFFECT OF DEFORMATION OF FLOW PART OF ELASTOMERIC ELEMENTS OF SELF-ACTING VALVES ON CHARACTERISTICS OF LOW-SPEED LONG-STROKE COMPRESSOR STAGES

I. S. Busarov, S. S. Busarov, V. L. Yusha

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

The results of the study of the influence of changes in the area of the flow section in the seat of self-acting valves with elastomeric elements on the characteristics of low-speed compressor stages are presented. A method of experimental research of low-speed compressor stages with the possibility of obtaining instantaneous parameters of the gas state in the working chamber of the stage and its integral characteristics and an experimental stand for its implementation have been developed. The results of comparative experimental studies have confirmed the effectiveness of the valve design with a variable cross-sectional area of the seat in comparison with known designs — an increase in the feed coefficient and isothermal indicator efficiency is at least 10...15%.

Keywords: compressor low-speed stage, experimental research, work processes, self-acting valve, elastomeric seat.

References

1. Ber G. D. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow, 1977. 518 p. (In Russ.).
2. Plastin 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.).
3. Yusha V. L., Busarov S. S. *Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney* [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and highpressurebased on unified lowspeed long-stroke stages] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye 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. (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. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Goshlya R. Yu. *Ekspperimental'noye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya* [Experimental study of working processes of low-speed longstroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18. (In Russ.).
6. Titov D. S., Busarov I. S., Busarov S. S. *Issledovaniye vliyaniya neplotnostey rabochey kamery na rabochiy protsess sverkhikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressornykh i nasosnykh agregatov* [Study of the influence of leaks in the working chamber on the working process of ultra-quiet long-stroke piston compressor and pumping units] // *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroyeniye*. 2019. No. 6. P. 25–27. (In Russ.).
7. Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Busarov I. S., Nedovenchany A. V. *Experimental determination of the conventional clearance in valves of oil-free reciprocating compressor units* // *International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2017*. 2017. Vol. 1876 (1). 020043. DOI: 10.1063/1.4998863. (In Engl.).
8. Fedyakov Ye. M., Koltakov V. K., Bogdat'yev Ye. Ye. *Izmereniye peremennykh davleniy* [Measuring variable pressures]. Moscow, 1982. 216 p. (In Russ.).
9. Kassandrova O. N., Lebedev V. V. *Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya* [Processing of observation results]. Moscow, 1970. 104 p. (In Russ.).
10. Zaydel A. N. *Pogreshnosti izmereniya fizicheskikh velichin* [Errors of measurement of physical quantities]. Leningrad, 1985. 112 p. (In Russ.).
11. Granovskiy V. S., Siraya T. N. *Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniyakh* [Methods of processing experimental data during measurements]. Leningrad, 1990. 288 p. ISBN 5-283-04480-7. (In Russ.).
12. Zaydel A. N. *Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy* [Elementary estimates of measurement errors]. Leningrad, 1968. 96 p. (In Russ.).
13. Cochran W. G. *Errors of Measurement in Statistics* // *Technometrics*. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. DOI: 10.2307/1267450. (In Engl.).
14. Nedovenchany A. V. *Povysheniye energeticheskoy i dinamicheskoy effektivnosti porshnevoogo maloraskhodnogo odnostupenchatogo kompressornogo agregata s lineynym gidroprivodom* [Increasing the energy and dynamic efficiency of a piston low-flow single-stage compressor unit with a linear hydraulic drive]. Omsk, 2020. 232 p. (In Russ.).
15. Gromov A. Yu. *Razrabotka porshnevnykh stupeney s lineynym privodom dlya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov i issledovaniye ikh rabochikh protsessov* [Development of piston stages with a linear drive for low-consumption compressor units and research of their working processes]. Kazan, 2017. 213 p. (In Russ.).
16. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Nedovenchany 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. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2016. Vol. 152. P. 297 – 302. DOI: 10.1016/J.PROENG.2016.07.706. (In Engl.).

BUSAROV Igor Sergeevich, Assistant of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department.

SPIN-code: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Correspondence address: habr86@mail.ru

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

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigerating and Compressor Equipment and Technology Department, Dean of Petrochemical Institute.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

For citations

Busarov I. S., Busarov S. S., Yusha V. L. The effect of deformation of flow part of elastomeric elements of self-acting valves on characteristics of low-speed long-stroke compressor stages // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38.

Received September 20, 2021.

© I. S. Busarov, S. S. Busarov, V. L. Yusha