

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ БЕССМАЗОЧНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ОТНОШЕНИЯХ ДАВЛЕНИЙ НАГНЕТАНИЯ К ДАВЛЕНИЮ ВСАСЫВАНИЯ

В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчанный, Р. Ю. Гошля

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

Теоретические исследования рабочих процессов тихоходных поршневых компрессорных ступеней с линейным приводом, проведённые авторами данной работы, определили необходимость экспериментального подтверждения возможности сжатия газа в одной ступени до давления 10,0 МПа и выше при атмосферном давлении всасывания. В работе представлены результаты испытаний вновь разработанной экспериментальной тихоходной поршневой компрессорной ступени с линейным гидравлическим приводом при отношении величин давления нагнетания к давлению всасывания от 50 до 100.

Ключевые слова: ступень длинноходового поршневого компрессора, рабочие процессы, гидравлический линейный привод, измерение мгновенной температуры и давления газа, интегральные характеристики, среднее и высокое давление нагнетания.

Введение

В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные по характеристикам рабочего процесса тихоходных длинноходовых поршневых ступеней при сжатии газов от атмосферного давления всасывания до высоких давлений нагнетания [1]. Теоретические расчёты рабочих процессов тихоходных длинноходовых ступеней, представленные в работах [1, 2], показали, что в такой ступени возможна реализация такого режима работы при обеспечении допустимых температур нагнетания и атмосферного давления всасывания. Под допустимой температурой нагнетания понимаем рекомендуемую температуру — не более 454К (для воздуха) [3]. Таким образом, актуальность данной работы заключается в экспериментальном доказательстве теоретических предположений, указанных выше.

Постановка задачи

Экспериментальные исследования рабочих процессов рассматриваемой ступени предполагает измерение мгновенных параметров состояния рабочего газа в цилиндре и интегральных характеристик ступени.

Для измерения быстроизменяющегося давления газа в рабочей камере ступени использовались кремневые датчики давления типа Д16, имеющие выходной сигнал в виде изменения напряжения пропорционально приложенному давлению [4, 5]. Измерение температуры было выполнено термисторами с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления [6–8].

Как показали проведённые ранее работы [9–11], в аналогичной ступени с диаметром цилиндра 20 мм и ходом поршня 200 мм не удалось достичь высоких давлений, что иллюстрируется кривой 3 на рис. 4 [11]. Поэтому для достижения поставленной цели по результатам предварительного теоретического

параметрического анализа была разработана новая экспериментальная ступень с диаметром цилиндра 0,05 м и ходом поршня 0,5 м.

Для проведения экспериментальных исследований разработан экспериментальный стенд с линейным (гидравлическим) приводом [12].

Фотографии стенда с установленной ступенью поршневого компрессора представлены на рис. 1. Линейным приводом в данной схеме служит гидравлический привод, содержащий насосный агрегат, масляный бак, фильтр высокого давления, дроссель, обеспечивающий регулировку расхода масла, обратный клапан, а также гидрораспределитель и силовой гидроцилиндр.

Измерительная схема приведена на рис. 2. Поршень 1 приводится в движение через шток 2 от штока гидроцилиндра, который, в свою очередь, приводится в действие от гидроаккумуляторной станции.



Рис. 1. Экспериментальный стенд с установленной тихоходной длинноходовой ступенью
Fig. 1. Experimental stand with an installed slow-speed long-range stage

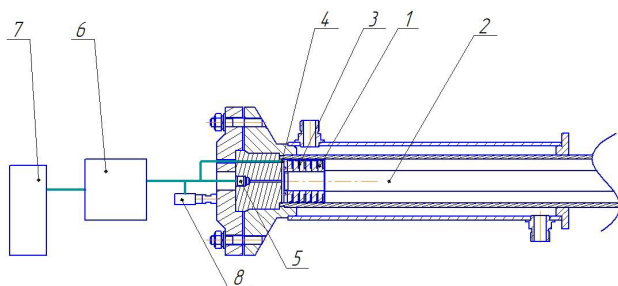


Рис. 2. Измерительная схема стенда
Fig. 2. Measuring scheme of the stand

Поскольку разработанная ступень является ступенью без смазки, уплотняющие манжеты 3, установленные на поршне 1, изготовлены из самосмазывающегося материала фторопласт — 4. Датчик давления 5 и датчик температуры 4 используются для определения соответственно давления и температуры сжимаемого газа в рабочей камере. Расход газа определяется датчиком расхода 8. Данные с датчика температуры, датчика давления и датчика расхода поступают на цифровой осциллограф 7 через усилитель 6.

Действительная производительность ступени определялась датчиком расхода AWM720P1 и пересчитывалась на условия всасывания — V_e . Таким образом, коэффициент подачи определялся как отношение действительной производительности к производительности идеальной тихоходной ступени при идентичных условиях всасывания, режимных и конструктивных параметрах [3]:

$$\lambda = \frac{V_e}{V_h}. \quad (1)$$

Изотермический индикаторный КПД определяется отношением величины индикаторной работы, полученной по экспериментальному графику зависимости мгновенного давления от величины объема рабочей камеры, к работе идеального изотермического компрессора [3]:

$$\eta = \frac{L_{инг.}}{P_{вс} \cdot \bar{V}_h \cdot \ln\left(\frac{P_h}{P_{вс}}\right)} = \frac{L_{инг.}}{L_{изинг.}}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования длинноходной тихоходной ступени проведены для ступени с диаметром цилиндра — 0,05 м; ходом поршня — 0,5 м; граничные условия — температура охлаждающей среды — 290 К, охлаждение интенсивное — водой; физические условия — сжимаемый газ — воздух; температура всасываемого газа — 290 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания до 10 МПа.

Теория

При выполнении экспериментальных исследований были определены погрешности измерения температуры, давления и расхода. Погрешность измерения мгновенной температуры при использовании бусинкового термистора [12, 13]:

$$\delta_0 = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_t^2}, \quad (3)$$

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

$$\delta_0 = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,2 \, \%.$$

Определим приборную погрешность при тарировке датчика давления, определяемую по формуле [6]:

$$\delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{MH}^2 + \delta_0^2}, \quad (4)$$

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 $\delta_0 = 3 \, \%$. В данном случае приборная погрешность является общей погрешностью, поскольку методика измерения напряжения при выполнении эксперимента и при проведении тарировки совершенно одинаковы. Также не учитывалось влияние случайных факторов. Их можно будет исключить, если некоторые значения, полученные при экспериментальном измерении, будут выпадать из общей системы. 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 $\delta_{VD} = 1,5 \, \%$. Тогда общая погрешность измерения расхода определяется по формуле:

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

Результаты экспериментов

Экспериментально полученные данные позволили определить доверительные области для таких параметров, как средняя температура нагнетания, коэффициент подачи, внутренний изотермический КПД при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ [14, 15].

На рис. 3–6 представлены экспериментальные зависимости как мгновенных параметров сжатия газа в рабочей камере, так и интегральные характеристики тихоходной ступени.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований: зависимости изменения средней температуры нагнетаемого газа для режима с интенсивным охлаждением и без охлаждения при давлении нагнетания до 1,1 МПа, время рабочего цикла составило 2,8 с. Для режима с интенсивным охлаждением средняя температура нагнетаемого газа при степени повышения давления 100 составляла 375 К, а для степени повышения давления 50 — 345 К.

При наличии интенсивного охлаждения газа температура на 20–30 К ниже чем при отсутствии интенсивного охлаждения.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований: зависимости коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления.

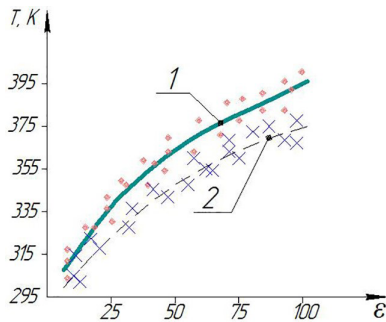


Рис. 3. Зависимость средней температуры нагнетаемого воздуха от степени повышения давления:
 1 — режим без охлаждения; 2 — режим с охлаждением
 Fig. 3. Dependence of the average temperature of the injected air on the degree of pressure increase:
 1 — mode without cooling; 2 — cooling mode

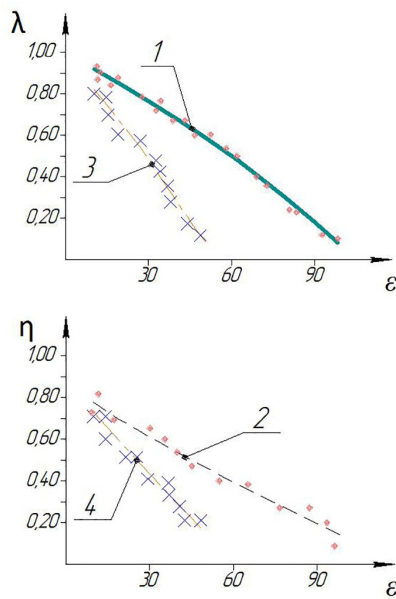


Рис. 4. Зависимость коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления при интенсивном внешнем охлаждении:
 1 — зависимость коэффициента подачи; 2 — зависимость индикаторного изотермического КПД; 3 — зависимость коэффициента подачи при диаметре цилиндра 0,02 м и ходе поршня 0,2 м [15]; 4 — зависимость индикаторного изотермического КПД при диаметре цилиндра 0,02 м и ходе поршня 0,2 м
 Fig. 4. Dependence of the feed factor and indicator isothermal efficiency on the degree of pressure increase with intensive external cooling:
 1 — dependence of the feed rate;
 2 — dependence of indicator isothermal efficiency;
 3 — dependence of the feed factor with a cylinder diameter of 0,02 m and a piston stroke of 0,2 m [15];
 4 — dependence of indicator isothermal efficiency with a cylinder diameter of 0,02 m and a piston stroke of 0,2 m

Коэффициент подачи уменьшается со значения 0,87 при степени повышения давления 5 и до значения 0,1 при степени повышения давления 100 при времени цикла $\tau = 2,8$ с. Изотермический индикаторный КПД также снижается с увеличением степени повышения давления.

На рис. 5 представлен график изменения мгновенного давления в рабочей камере за время цикла, на рис. 6 представлены графики изменения мгновенной температуры в рабочей камере за время цикла.

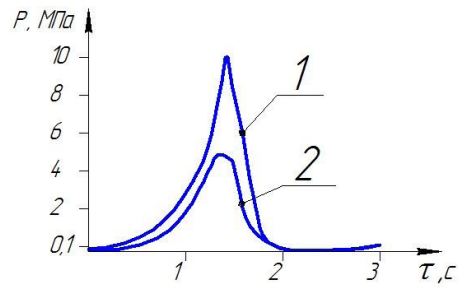


Рис. 5. График изменения давления в рабочей камере за время цикла:
 1 — $P_n = 10$ МПа; 2 — $P_n = 6$ МПа
 Fig. 5. Graph of the pressure variation in the working chamber during the cycle:
 1 — $P_n = 10$ МПа; 2 — $P_n = 6$ МПа

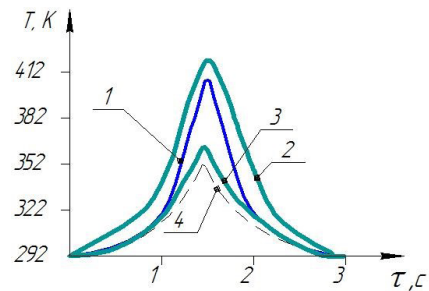


Рис. 6. График изменения температуры в рабочей камере за время цикла:
 1 — режим без охлаждения, $P_n = 10$ МПа;
 2 — режим с охлаждением ($P_n = 10$ МПа);
 3 — режим без охлаждения, $P_n = 6$ МПа;
 4 — режим с охлаждением ($P_n = 6$ МПа)
 Fig. 6. Graph of temperature change in the working chamber during the cycle:
 1 — mode without cooling, $P_n = 10$ МПа;
 2 — cooling mode ($P_n = 10$ МПа);
 3 — a mode without cooling, $P_n = 6$ МПа;
 4 — a mode with cooling ($P_n = 6$ МПа)

Заключение

Таким образом, экспериментально доказано, что в одной ступени возможно сжимать газ до высоких давлений при допустимых температурах нагнетаемого газа. Зависимости коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления показали, что в исследуемых ступенях при больших значениях степени повышения давления играют важную роль и утечки, и величина мёртвого объёма. Установка датчиков в рабочей камере вносит своё негативное влияние на величину общего мёртвого объёма, поэтому при дальнейших исследованиях мёртвый объём будет минимизирован за счёт исключения всех датчиков из рабочей камеры и оптимизации конструкции, что позволит экспериментально определить максимально технически возможную степень повышения давления в одной тихходной ступени.

Список источников

1. Бусаров С. С., Васильев В. К., Бусаров И. С., Сажин Б. С., Панин Ю. Н. Параметрический анализ рабочих процессов тихходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчёта // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 40 — 44.

2. Бусаров С. С., Васильев В. К., Бусаров И. С., Титов Д. С., Громов А. Ю. Параметрический анализ рабочих процессов холодильных и газовых тихоходных длинноходовых бесшмазочных поршневых компрессорных ступеней // Казахстан-Холод 2017: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Алматы: Изд-во АТУ, 2017. С. 47–51.

3. Plastinin P., Fedorenko Sergei. Simulation of transient gas-temperatures in cylinders of reciprocating compressors using identification techniques with a mathematical model // International Compressor Engineering Conference. 1978. P. 295. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295> (дата обращения: 23.01.2018).

4. Baird D. C. Experimentation: an introduction to measurement theory and experiment design. 3rd ed. Prentice Hall Inc.: Englewood Cliffs, New Jersey, 1995. 210 p. ISBN 978-0133032987; 0133032981.

5. Altman D., Machin D., Bryant T. Statistics with confidence: Confidence intervals and statistical guidelines / Ed. M. Gardner. 2nd ed. NY: BMJ Books, 2000. 240 p. ISBN 9780727913753.

6. Barsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensing in the presence of humidity // Journal of Physics: Condensed Matter. 2003. 15: R813–R839. URL: stacks.iop.org/JPhysCM/15/R813 (дата обращения: 23.01.2018).

7. Krstev I.; Helwig A., Müller G. [et al.]. Detection of random vapour concentrations using an integrating diamond gas sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. 2014. Vol. 195. P. 603–608. DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.093.

8. Дубровский В. В., Иванов Д. М., Пратусевич Н. Я. [и др.]. Резисторы: справочник. М., 1991. 528 с. ISBN 5-256-00374-7/5256003747.

9. 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 // Procedia Engineering. International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706.

10. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Vasiliev V. K. The experimental research of the operating Processes in slow speed stages of air reciprocating medium-pressure // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039-1–020039-7. DOI:10.1063/1.4998859.

11. 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(3). DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.

12. Вильнер Я. М. [и др.]. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / под ред. Б. Б. Некрасова. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: Высшая школа, 1985. 382 с.

13. Cochran W. G. Errors of measurement in statistics // Technometrics. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666.

14. Brown L. D., Cai T. T., Dasgupta A. Interval estimation for a binomial proportion // Statistical science. 2001. Vol. 16, no. 2. P. 101–133.

15. Sauro J., Lewis J. R. Estimating completion rates from small samples using binomial confidence intervals: comparisons and recommendations // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting. 2005. P. 2100–2104.

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

SPIN-код: 1503-9666

AuthorID (РИНЦ): 610283

ORCID: 0000-0001-9858-7687

Адрес для переписки: yusha@omgtu.ru

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

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID(РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

ГОШЛЯ Роман Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

AuthorID (РИНЦ): 518331

AuthorID (SCOPUS): 57191043792

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

Для цитирования

Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Гошля Р. Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшмазочных 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.

Статья поступила в редакцию 26.03.2018 г.

© В. Л. Юша, С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Р. Ю. Гошля

EXPERIMENTAL STUDY OF WORKING PROCESSES OF LOW-SPEED LONG-STROKE LUBRICATION FREE PISTON COMPRESSOR STAGES AT HIGH DISCHARGE PRESSURE TO SUCTION PRESSURES

V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, R. Yu. Goshlya

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

Theoretical studies of working processes of slow-speed reciprocating compressor stages with linear drive, carried out by the authors of this work, there is determined the necessity of experimental confirmation of the possibility of gas compression in one stage up to a pressure of 10,0 MPa and higher at atmospheric suction pressure. The paper presents the results of testing the newly developed low-speed piston compressor stage with a linear hydraulic drive with a ratio of discharge pressure to suction pressure from 50 to 100.

Keywords: stage of long-stroke reciprocating compressor, working processes, hydraulic linear drive, measurement of instantaneous temperature and gas pressure, integral characteristics, medium and high discharge pressure.

References

1. Busarov S. S., Vasil'yev V. K., Busarov I. S., Sazhin B. S., Panin Yu. N. Parametricheskiy analiz rabochnik protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupeney na baze verifitsirovannoy metodiki rascheta [Parametric analysis of working processes of low-speed long-stroke lubricating piston compressor stages on the basis of verified calculation technique] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. No. 4 (154). P. 40–44. (In Russ.).
2. Busarov S. S., Vasil'yev V. K., Busarov I. S., Titov D. S., Gromov A. Yu. Parametricheskiy analiz rabochnik protsessov kholodil'nykh i gazovykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupeney [Parametric analysis of working processes of refrigerating and gas slow-running long-stroke lubricating piston compressor stages] // *Kazakhstan-Kholod 2017*. Almaty: ATU Publ., 2017. P. 47–51. (In Russ.).
3. Plastinin P., Fedorenko Sergei. Simulation of transient gas-temperatures in cylinders of reciprocating compressors using identification techniques with a mathematical model // International Compressor Engineering Conference. 1978. P. 295. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295> (accessed: 23.01.2018). (In Engl.).
4. Baird D. C. Experimentation: an introduction to measurement theory and experiment design. 3rd ed. Prentice Hall Inc.: Englewood Cliffs, New Jersey, 1995. 210 p. ISBN 978-0133032987; 0133032981. (In Engl.).
5. Altman D., Machin D., Bryant T. Statistics with confidence: Confidence intervals and statistical guidelines / Ed. M. Gardner. 2nd ed. NY: BMJ Books, 2000. 240 p. ISBN 9780727913753. (In Engl.).
6. Barsan N., Weimar U. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensing in the presence of humidity // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2003; 15: R813–R839. URL: stacks.iop.org/JPhysCM/15/R813 (accessed: 23.01.2018). (In Engl.).
7. Krstev I., Helwig A., Müller G. [et al.]. Detection of random vapour concentrations using an integrating diamond gas sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. Vol. 195. P. 603–608. DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.093. (In Engl.).
8. Dubrovskiy V. V., Ivanov D. M., Prutsevich N. Ya. [et al.]. *Rezistory: spravochnik [Resistors: handbook]*. Moscow, 1991. 528 p. ISBN 5-256-00374-7/5256003747. (In Russ.).
9. 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 // *Procedia Engineering*. International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2016. Vol. 152. P. 297–302. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.706. (In Engl.).
10. Yusha V. L., Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Vasiliev V. K. The experimental research of the operating Processes in slow speed stages of air reciprocating medium-pressure // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020039–1–020039–7. DOI:10.1063/1.4998859. (In Engl.).
11. 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(3). DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2. (In Engl.).
12. Vil'ner Ya. M. [et al.]. *Spravochnoye posobiye po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam [A reference manual on hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]* / Ed. B. B. Nekrasov. 2nd ed. Minsk: Vysshaya shkola Publ., 1985. 382 p. (In Russ.).
13. Cochran W. G. Errors of measurement in statistics // *Technometrics*. 1968. Vol. 10, no. 4. P. 637–666. (In Engl.).
14. Brown L. D., Cai T. T., Dasgupta A. Interval estimation for a binomial proportion // *Statistical science*. 2001. Vol. 16, no. 2. P. 101–133. (In Engl.).
15. Sauro J., Lewis J. R. Estimating completion rates from small samples using binomial confidence intervals: comparisons and recommendations // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*. 2005. P. 2100–2104. (In Engl.).

YUSHA Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department. SPIN-code: 1503-9666; AuthorID (RSCI): 610283 ORCID: 0000-0001-9858-7687
Address for correspondence: yusha@omgtu.ru
BUSAROV Sergey Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department. AuthorID (RSCI): 610336
AuthorID (SCOPUS): 51560987400



NEDOVENCHANY Aleksey Vasil'yevich, Graduate Student of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

GOSLYA Roman Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department.

AuthorID (RSCI): 518331

AuthorID (SCOPUS): 57191043792

Address for correspondence: lonewolf_rus88@mail.ru

For citations

Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Goshlya R. Yu. Experimental study of working processes of low-speed long-stroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures // 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.

Received 26 March 2018.

© V. L. Yusha, S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, R. Yu. Goshlya