

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ БЕССМАЗОЧНЫХ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ ПОРШНЕВЫХ СТУПЕНЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

С. С. Бусаров¹, А. В. Недовенчанный¹, Д. И. Буханец², К. В. Щербань¹

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Радиотехнический институт академика А. Л. Минца,
Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1

Результаты проведённых экспериментальных исследований рабочих процессов воздушной длинноходной ступени поршневого компрессора позволили верифицировать методику расчёта для рассмотренного типоразмера ступени с учётом влияния интенсивного охлаждения и без интенсивного охлаждения при повышении давления от атмосферного до давления 10 МПа в одной ступени, что до настоящего момента не было выполнено ни одним из исследователей.

Ключевые слова: длинноходовой поршневой компрессор, рабочие процессы, измерение мгновенной температуры и давления газа, экспериментальные исследования поршневых компрессоров, высокое давление.

Введение

При выполнении расчётов рабочих процессов поршневых компрессорных агрегатов исследователи в настоящее время широко применяют методики, содержащие систему термодинамических уравнений в дифференциальной форме и ряд уравнений, полученных экспериментальным путём, для определения отдельных составляющих рабочих процессов, например, для определения мгновенного коэффициента теплоотдачи в рабочей камере компрессорной ступени [1–3].

Постановка задачи

Известно, что каждое эмпирическое соотношение справедливо для ограниченного диапазона определяющих конструктивных и режимных параметров. Проблема математического моделирования вновь разрабатываемых конструкций поршневых компрессоров состоит в неопределённости касательно вопроса корректности применения известных эмпирических соотношений, полученных для других объектов.

В известных методиках расчёта рабочих процессов поршневых компрессоров для определения мгновенного коэффициента теплоотдачи применяются эмпирические соотношения, справедливые для определённых режимных и конструктивных параметров ступени [3–5]. Вместе с тем для тихоходных длинноходовых ступеней поршневого компрессора [6, 7] существенное снижение скоростей газа в проточной части ступени привело к необходимости уточнения зависимостей, описывающих процессы теплообмена в рабочей камере [8, 9]. В данной статье на примере низкооборотного поршневого компрессора (время рабочего цикла 2,5–4 с и определяющий параметр $\Psi = S/d$, равный 10) показана возможность определения коэффициента теплоотдачи на основе формулы Прилуцкого И. К. [10], откорректированной по результатам экспери-

ментального исследования применительно к рассматриваемым режимным и конструктивным параметрам тихоходной поршневой ступени.

Теория

Экспериментальные исследования рабочего процесса тихоходной ступени поршневого компрессора выполнены на стенде и по методике, описанной в [9, 11, 12]. При этом обеспечивались следующие условия однозначности: геометрические условия — диаметр цилиндра — 0,05 м; ход поршня — 0,5 м; граничные условия — температура охлаждающей среды — 290 К, охлаждающая среда — вода, воздух; физические условия — сжимаемый газ — воздух; температура газа на всасывании — 290 К, давление всасывания — 0,1 МПа, давление нагнетания — 4–10 МПа; время рабочего цикла — 2,5–4 с.

Для теоретических расчётов рабочего процесса тихоходной ступени поршневого компрессора за основу принята математическая модель рабочего процесса ступени поршневого компрессора с сосредоточенными параметрами [3, 4, 13], в которой определение нестационарных граничных условий на внутренних поверхностях стенок рабочей камеры ступени производится путем расчета рабочего цикла ступени поршневого компрессора. При этом математическая модель базируется на общепринятой системе упрощающих допущений и основных расчётах уравнений, включающих уравнение закона сохранения энергии для тела переменной массы, уравнение массового баланса, уравнение состояния, следствие закона Джоуля для внутренней энергии газа, уравнения расхода газа через клапан и конвективного теплообмена между газом и стенками рабочей камеры. Математические модели компрессорной ступени такого типа классифицируются как модели второго уровня и широко применяются в практике исследования и проектирования компрессоров объёмного принципа действия [3, 4]. Граничные условия на внешней поверхности стенок

рабочей камеры носят слабопеременный характер, обусловленный малой амплитудой изменения температуры стенок за время рабочего цикла [11] и практически постоянными параметрами охлаждающей среды. Комплексным параметром, характеризующим условия внешнего теплоотвода, является приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пр}$, а также температура охлаждающей среды.

В связи с продолжительным временем рабочего цикла исследуемого объекта по сравнению с быстроходными машинами становится актуальным учёт утечек через неплотности рабочей камеры.

Как было отмечено во введении, особенно актуально в рассматриваемом случае определить корректную формулу для определения величины нестационарного циклического теплового потока между поверхностями рабочей камеры ступени и рабочим газом.

За основу принята известная формула Прилуцкого И. К. [10]:

$$\alpha = \lambda \cdot (\rho \cdot \mu)^x \cdot W^x \cdot D_{экр}^{1-x},$$

где λ , μ , $D_{экр}$, W — текущие значения соответственно коэффициента теплопроводности, динамической вязкости, эквивалентного диаметра цилиндра и условной скорости газа в рабочей камере; x — эмпирический коэффициент.

Привлекательность данной формулы состоит в том, что эмпирический коэффициент x можно подобрать для конкретных режимных и конструктивных параметров ступени таким образом, чтобы формула обеспечивала корректные результаты расчёта процессов теплоотдачи для рассматриваемого объекта.

Результаты экспериментов

На рис. 1–6 представлены экспериментальные и теоретические зависимости мгновенных параметров сжимаемого газа в рабочей камере для различных давлений. Теоретические зависимости получены с помощью доработанной методики расчёта рабочего процесса компрессорной ступени, учитывающей реальные утечки газа в ступени и скорректированную формулу для расчёта коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры. Погрешность результатов при моделировании мгновенного давления — не более 2 %, погрешность результатов при моделировании мгновенной температуры — не более 8 %.

На рис. 7, 8 представлены экспериментальные и теоретические зависимости средней температуры нагнетания, погрешность результатов при моделировании не более 4 %.

На рис. 9–12 представлены экспериментальные и теоретические зависимости коэффициента подачи и изотермического КПД, погрешность результатов при моделировании не более 10 %.

Проведённые экспериментальные исследования установили, что для рассматриваемой ступени при коэффициенте $x = 0,27$ расхождение между значениями мгновенной температуры газа, полученными экспериментально и теоретически, не превышает 8 % при различных режимах работы.

Таким образом, уравнение приобретает вид:

$$\alpha = \lambda \cdot (\rho \cdot \mu)^{0,27} \cdot W^{0,27} \cdot D_{экр}^{1-0,27}$$

и может быть использовано в математической модели рабочего процесса тихоходной поршневой ступени при выполнении её расчётно-параметрического анализа.

Данная формула предпочтительна для применения в математической модели рабочего процесса тихоходной длинноходовой поршневой ступени при выполнении её расчётно-параметрического анализа для данного типоразмера (диаметр цилиндра — 0,05 м; ход поршня — 0,25...0,5 м).

Ранее в работе [8] была получена единая формула для расчёта коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры с коэффициентом $x = 0,6$. На рис. 1, 2, 4, 5 представлено сравнение вновь полученных зависимостей при коэффициенте $x = 0,27$ и ранее полученных результатов при $x = 0,6$. Погрешность результатов превышает в некоторых случаях 25 %, что говорит об отсутствии универсальности применяемой формулы Прилуцкого И. К.

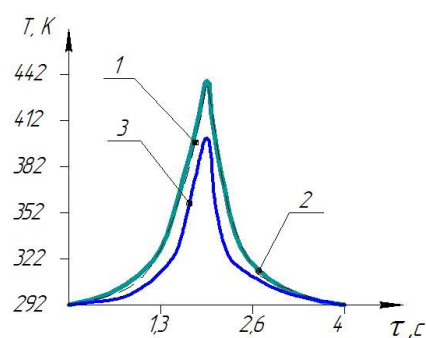


Рис. 1. Изменение температуры сжимаемого газа в рабочей камере без интенсивного охлаждения ступени ($P_n = 8,5$ МПа; $\tau = 4$ с):

— экспериментальная кривая;
— теоретическая кривая;
— теоретическая кривая при $x = 0,6$

Fig. 1. Change in the temperature of the compressible gas in the working chamber without intensive cooling ($P_n = 8,5$ МПа, $\tau = 4$ s):

— the experimental curve;
— theoretical curve;
— theoretical curve at $x = 0,6$

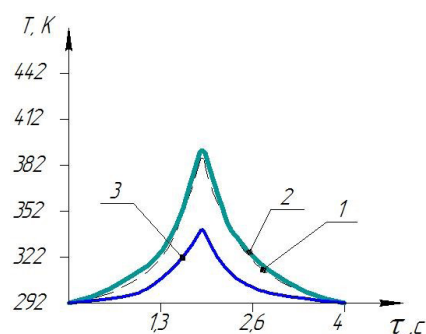


Рис. 2. Изменение температуры сжимаемого газа в рабочей камере с интенсивным охлаждением ступени ($P_n = 8,5$ МПа; $\tau = 4$ с):

— экспериментальная кривая;
— теоретическая кривая;
— теоретическая кривая при $x = 0,6$

Fig. 2. Change in the temperature of the compressible gas in the working chamber with intensive cooling of the stage ($P_n = 8,5$ МПа, $\tau = 4$ s):

— the experimental curve;
— theoretical curve;
— theoretical curve at $x = 0,6$

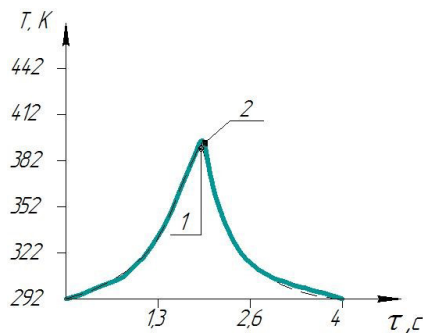


Рис. 3. Изменение температуры сжимаемого газа в рабочей камере без интенсивного охлаждения ступени ($P_u = 4,7$ МПа; $\tau = 3$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая

Fig. 3. Change in the temperature of the compressible gas in the working chamber without intensive cooling of the stage ($P_u = 4,7$ МПа, $\tau = 3$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve

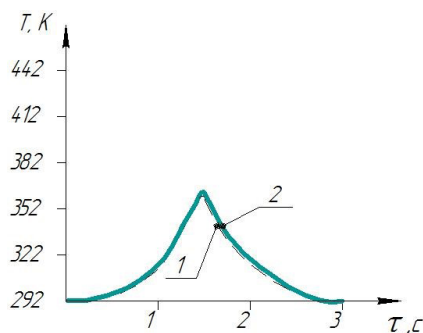


Рис. 4. Изменение температуры сжимаемого газа в рабочей камере с интенсивным охлаждением ступени ($P_u = 4,7$ МПа; $\tau = 3$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;

Fig. 4. Change in the temperature of the compressible gas in the working chamber with intensive cooling of the stage ($P_u = 4,7$ МПа, $\tau = 3$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve

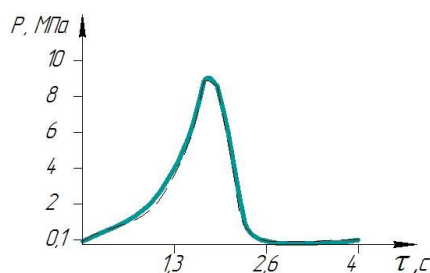


Рис. 5. Зависимость давления сжимаемого газа в рабочей камере ($P_u = 8,5$ МПа; $\tau = 4$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая

Fig. 5. The dependence of the compressible gas pressure in the working chamber ($P_u = 8,5$ МПа, $\tau = 4$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve

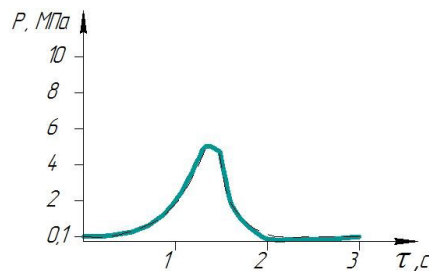


Рис. 6. Зависимость давления сжимаемого газа в рабочей камере от времени цикла ($P_u = 4,7$ МПа; $\tau = 3$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая

Fig. 6. The dependence of the pressure of the compressible gas in the working chamber on the cycle time ($P_u = 4,7$ МПа, $\tau = 3$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve

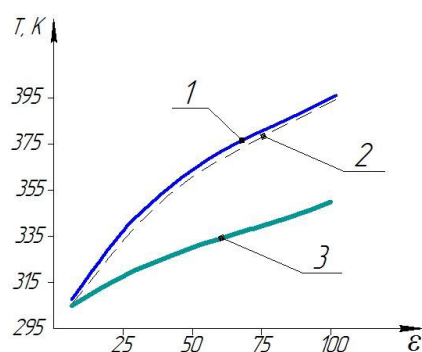


Рис. 7. Зависимость средней температуры нагнетаемого газа без интенсивного охлаждения ступени от степени повышения давления ($\tau = 3$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$

Fig. 7. The dependence of the average temperature of the injected gas without intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 3$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

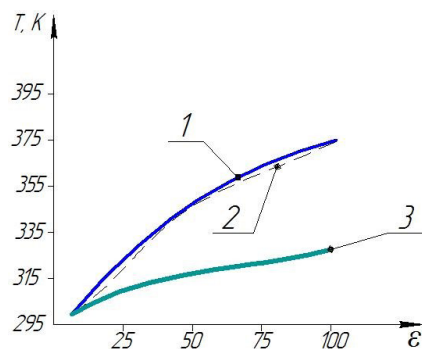


Рис. 8. Зависимость средней температуры нагнетаемого газа с интенсивным охлаждением ступени от степени повышения давления ($\tau = 3$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$

Fig. 8. The dependence of the average temperature of the injected gas with intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 3$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

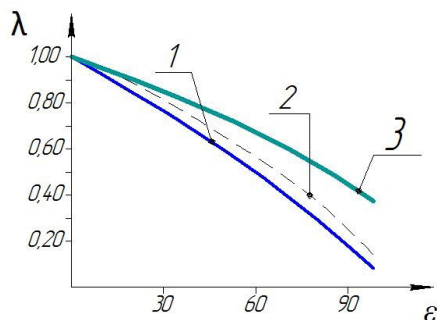


Рис. 9. Зависимость коэффициента подачи без интенсивного охлаждения ступени от степени повышения давления ($\tau = 2,8$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$
 Fig. 9. The dependence of the feed factor without intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 2,8$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

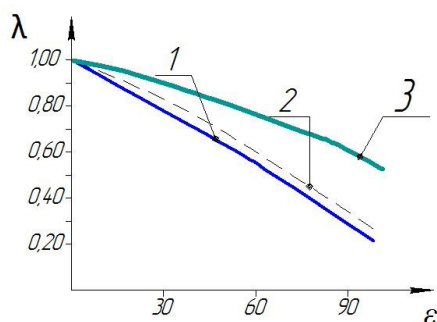


Рис. 10. Зависимость коэффициента подачи с интенсивным охлаждением ступени от степени повышения давления ($\tau = 2,8$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$
 Fig. 10. The dependence of the feed factor with intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 2,8$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

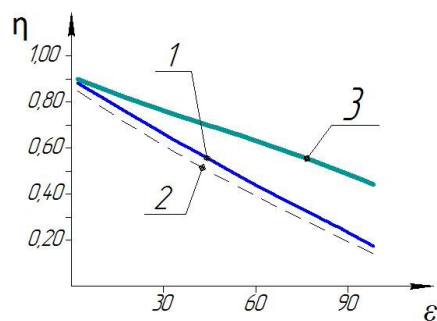


Рис. 11. Зависимость изотермического индикаторного КПД без интенсивного охлаждения ступени от степени повышения давления ($\tau = 2,8$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$
 Fig. 11. The dependence of the isothermal indicator efficiency without intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 2,8$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

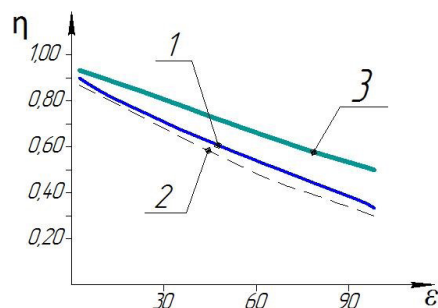


Рис. 12. Зависимость изотермического индикаторного КПД с интенсивным охлаждением ступени от степени повышения давления ($\tau = 2,8$ с):
 — экспериментальная кривая;
 ----- теоретическая кривая;
 — теоретическая кривая при $x = 0,6$
 Fig. 12. The dependence of the isothermal indicator efficiency with intensive cooling of the stage on the degree of pressure increase ($\tau = 2,8$ s):
 — the experimental curve;
 ----- theoretical curve;
 — theoretical curve at $x = 0,6$

Заключение

Таким образом, применяемая ранее методика расчёта [13] модернизирована по полученным экспериментальным данным, позволившим применить формулу Прилуцкого И. К. [10] для расчёта коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры при коэффициенте $x = 0,27$ и следующих параметрах ступени: (диаметр цилиндра — 0,05 м; ход поршня — 0,25...0,5 м).

Однако, анализируя результаты, полученные в данной работе, и результаты проведённых ранее исследований тихоходных ступеней [8, 9, 13, 14], видим, что для различных типоразмеров и различных режимов работы тихоходных ступеней получаемый эмпирический коэффициент различен. Поэтому целью дальнейших исследований будет являться получение единой зависимости для всех режимных и конструктивных параметров тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней.

Список источников

1. Davies R., Bell A. Mathematical modeling of reciprocation air compressors // Mining Technol. 1987. Vol. 69, no. 795. P. 13–14.
2. Gaurav Bhalla, Lynn Y. S. Lin. Cross-cultural marketing research: A discussion of equivalence issues and measurement strategies // Psychology and Marketing. 1987. Vol. 4 (4). P. 275–285.
3. Plastinin P., Fedorenko S. Simulation of transient gas-temperatures in cylinders of reciprocating compressors using identification techniques with a mathematical model // International Compressor Engineering Conference. 1978. P. 380. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295> (дата обращения: 15.01.2018).
4. 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. P. 211–216. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108> (дата обращения: 15.01.2018).
5. Luszczycki M., Cyklis P., Zelasko J. Developed mathematical model of the self-acting valves of the reciprocating compressor and its application for tongue valves // International Compressor Engineering Conference. 1992. P. 1241–1248. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/918> (дата обращения: 19.01.2018).

6. Yusha V. L., Dengin V. G., Karagusov V. I., Busarov S. S. Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke // 8th International Conference on Compressors and Coolants. 2013. Papiernička, Slovakia. Book of abstracts. P. 22.

7. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Васильев В. К., Громов А. Ю., Чижилов М. А. Теоретическая оценка возможности замены многоступенчатых малорасходных поршневых компрессоров на одноступенчатые // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 66–69.

8. Бусаров С. С., Громов А. Ю., Бусаров И. С., Титов Д. С., Васильев В. К. Модернизация методики расчёта процессов теплообмена в рабочей камере воздушного одноступенчатого тихоходного поршневого компрессора среднего давления на основании экспериментальных исследований // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 3. С. 14–18.

9. Yusha V. L., Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Gromov A. Yu., Titov D. S., Scherban K. V. Verification of the operating processes calculation technique for slow speed oil-free stages of reciprocating medium-pressure compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. 2017. AIP Conference Proceedings. Vol. 1876, Issue 1. P. 020042-1–020044-6. DOI:10.1063/1.4998862.

10. Прилуцкий А. И., Прилуцкий И. К., Иванов Д. Н. [и др.]. Теплообмен в ступенях машин объёмного действия. Современный подход // Компрессорная техника и пневматика. 2009. № 2. С. 16–23.

11. Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2015. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2015. Vol. 113. P. 264–269.

12. 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. Procedia Engineering: Elsevier BV. 2016. Vol. 152. P. 297–302.

13. 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.

14. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // Chemical and petroleum engineering. 2015. Vol. 51, Issue 3-4. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5.

БУСАРОВ Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

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

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

БУХАНЕЦ Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), начальник отдела Радиотехнического института академика А. Л. Минца, г. Москва.

ЩЕРБАНЬ Кирилл Владимирович, аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», ОмГТУ.

SPIN-код: 1093-3377

AuthorID (РИНЦ): 883560

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

Для цитирования

Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Буханец Д. И., Щербань К. В. Верификация методики расчёта рабочих процессов бесшмазочных тихоходных длинноходовых поршневых ступеней высокого давления // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 19–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-19-25.

Статья поступила в редакцию 30.01.2018 г.

© С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Д. И. Буханец, К. В. Щербань

VERIFICATION OF PROCEDURE FOR CALCULATING THE WORKING PROCESSES OF LUBRICATION FREE LOW-SPEED LONG-STROKE PISTON HIGH-PRESSURE STAGES

S. S. Busarov¹, A. V. Nedovenchany¹, D. I. Bukhanets², K. V. Scherban¹

¹Omsk State Technical University,

Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²Radiotechnical Institute of Academician A. L. Mints,

Russia, Moscow, 8 March St., 10, build. 1, 127083

The results of the conducted experimental studies of operating processes of the air-speed slow-speed stage of the pre-price compressor verifying the calculation method for the described stage size taking into account the effect of intensive cooling and without intensive cooling with increasing pressure from atmospheric pressure to 10 MPa in one stage, which until now has not been accomplished by any pressing from the researchers.

Keywords: long-stroke reciprocating compressor, working processes, instantaneous gas temperature and pressure measurement, experimental research of reciprocating compressors, high pressure.

References

1. Davies R., Bell A. Mathematical modeling of reciprocation air compressors // Mining Technol. 1987. Vol. 69, no. 795. P. 13–14. (In Engl.).

2. Gaurav Bhalla, Lynn Y. S. Lin. Cross-cultural marketing research: A discussion of equivalence issues and measurement strategies // Psychology and Marketing. 1987. Vol. 4 (4). P. 275–285. (In Engl.).

3. Plastinin P., Fedorenko S. Simulation of transient gas-temperatures in cylinders of reciprocating compressors using identification techniques with a mathematical model // International Compressor Engineering Conference. 1978. P. 380. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/295> (accessed: 15.01.2018). (In Engl.).

4. 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. P. 211–216. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108> (accessed: 15.01.2018). (In Engl.).

5. Luszczycki M., Cyklic P., Zelasko J. Developed mathematical model of the self-acting valves of the reciprocating compressor and its application for tongue valves // International Compressor Engineering Conference. 1992. P. 1241–1248. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/918> (accessed: 19.01.2018). (In Engl.).

6. Yusha V. L., Dengin V. G., Karagusov V. I., Busarov S. S. Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke // 8th International Conference on Compressors and Coolants. 2013. Papiernička, Slovakia. Book of abstracts. P. 22. (In Engl.).

7. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Vasil'yev V. K., Gromov A. Yu., Chizhikov M. A. Teoreticheskaya otsenka vozmozhnosti zameny mnogostupenchatykh maloraskhodnykh porshnevnykh kompressorov na odnostupenchatyye [A theoretical estimate of possibility of replacing low consumption multi-stage reciprocating compressors] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015. No. 3 (143). P. 66–69. (In Russ.).

8. Busarov S. S., Gromov A. Yu., Busarov I. S., Titov D. S., Vasil'yev V. K. Modernizatsiya metodiki rascheta protsessov teploobmena v rabochey kamere vozdušnogo odnostupenchatogo tikhokhodnogo porshnevoogo kompressora srednego davleniya na osnovanii eksperimental'nykh issledovaniy [Modernization of the

calculation procedure for heat exchange processes in the working chamber of an air single-stage low-speed reciprocating compressor of medium pressure on the basis of experimental studies] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Engineering and Pneumatics*. 2017. No. 3. P. 14–18. (In Russ.).

9. Yusha V. L., Busarov S. S., Vasil'ev V. K., Gromov A. Yu., Titov D. S., Scherban K. V. Verification of the operating processes calculation technique for slow speed oil-free stages of reciprocating medium-pressure compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2017. 2017. AIP Conference Proceedings. Vol. 1876, Issue 1. P. 020042-1–02004-6. DOI:10.1063/1.4998862. (In Engl.).

10. Prilutskiy A. I., Prilutskiy I. K., Ivanov D. N. [et al.]. Teploobmen v stupenyakh mashin ob'yemnogo deystviya. Sovremennyy podkhod [Heat exchange in stages of volumetric machines. Modern approach] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Engineering and Pneumatics*. 2009. No. 2. P. 16–23. (In Russ.).

11. Yusha V. L., Dengin V. G., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // International Conference on Oil and Gas Engineering. OGE-2015. *Procedia Engineering*; Elsevier BV. 2015. Vol. 113. P. 264–269. (In Engl.).

12. 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. (In Engl.).

13. Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Gromov A. Yu., Nedovenchany A. V., Busarov I. S., Titov D. S. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov teploobmena v rabochey kamere tikhokhodnoy stupeni porshnevoogo kompressra [Mathematical modeling of heat transfer processes in the working chamber of a slow-speed piston compressor stage] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Engineering and Pneumatics*. 2016. No. 6. P. 6–10. (In Russ.).

14. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // *Chemical and petroleum engineering*. 2015. Vol. 51, Issue 3-4. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5. (In Engl.).

BUSAROV Sergey Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

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

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

BUKHANETS Dmitriy Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Radiotechnical Institute of Academician A. L. Mints, Moscow.

SCHERBAN' Kirill Vladimirovich, Graduate Student of Refrigeration and Compressor Engineering and

Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1093-3377

AuthorID (RSCI): 883560

Address for correspondence: lonewolf_rus88@mail.ru

For citations

Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Bukhanets D. I., Scherban' K. V. Verification of procedure for calculating working processes of lubrication free low-speed long-stroke piston high-pressure stages // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, no. 2. P. 19–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-19-25.

Received 30 January 2018.

© S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, D. I. Bukhanets,
K. V. Scherban'