

УДК 621.512

Учет критерия скорости газа при построении упрощенной схематизированной индикаторной диаграммы действительного компрессора^{*}

Р.Э. Кобыльский, С.С. Бусаров, И.С. Бусаров

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Accounting for the gas velocity criterion in constructing a simplified schematized indicator diagram of the real compressor

R.E. Kobylsky, S.S. Busarov, I.S. Busarov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University

Исследовано влияние критерия скорости газа на усредненные потери давления газа в органах газораспределения. Выполнен сравнительный анализ упрощенных схематизированных диаграмм, построенных по стандартной методике расчета потерь давления газа в клапанах и с учетом критерия скорости газа. Установлено, что погрешность потерь давления газа, определенных с учетом критерия скорости газа и по стандартной методике, составляет в среднем 5,57 %, что может существенно повлиять на точность расчета поршневых компрессоров большой производительности. Установлено, что для клапанов всасывания усредненные потери газа с учетом критерия скорости газа больше на 3,6...7,2 %, чем без его учета. Для клапанов нагнетания учет критерия скорости газа оказался менее выразительным. Определено, что при критерии скорости газа 0,10...0,14 усредненные потери давления газа, рассчитанные с учетом этого критерия, будут больше, чем значения, полученные по стандартной методике, а при критерии скорости газа 0,16...0,22 — меньше.

EDN: GGVPPC, <https://elibrary/ggvppc>

Ключевые слова: индикаторная диаграмма, критерий скорости газа, усредненные потери давления, клапаны всасывания, клапаны нагнетания

The paper analyzes the gas velocity criterion influence on the average gas pressure loss in the gas distribution systems. It presents a comparative analysis of the simplified schematized diagrams constructed using a standard method of computing gas pressure losses in the valves and accounting for the gas velocity criterion. The results obtained indicate that the error in computing the gas pressure loss taking into account the gas velocity criterion compared to the standard method is on the average 5.57 %, which could be a significant value when computing the high-performance compressors. The paper indicates that for the suction valves, the average gas loss taking into account the gas velocity criterion is by 3.6...7.2 % higher than without it. For the discharge valves, accounting for the gas velocity criterion turns out to be less expressive. The paper notes that with the gas velocity criterion of 0.10...0.14, the average gas pressure loss computed with this criterion would be greater than the values obtained using the standard method, and at the velocity of 0.16...0.22, they would be less.

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00272.

EDN: GGVPPC, <https://elibrary/ggvppc>

Keywords: indicator diagram, gas velocity criterion, average pressure loss, suction valves, discharge valves

Для нахождения качественных характеристик поршневого компрессора (ПК) используют схематизированную индикаторную диаграмму (СИД). С помощью СИД определяют производительность и мощность, необходимую для сжатия и перемещения газа, а также изучают работу клапанов. Иногда для решения одной и той же задачи существует несколько типов СИД. Схематизация СИД включает в себя схематизацию основной части, потерь давления во всасывающих и нагнетательных клапанах [1–5].

Для практических расчетов применяют упрощенную СИД действительного ПК, образованную двумя эквивалентными политропами (сжатия n_c и расширения n_p) и двумя горизонтальными линиями с учетом потерь давления газа во всасывающем и нагнетательном клапанах, показанную на рис. 1. Здесь p и V — давление в цилиндре и его объем; $\bar{V}_h$ — описанный объем рабочей камеры; V_m — мертвый объем; p_1 и p_2 — условное давление всасывания и нагнетания; Δp_1 и Δp_2 — потери давления на всасывании и нагнетании; 1–2, 2–3, 3–4 и 4–1 — процесс сжатия, нагнетания, обратного расширения и всасывания соответственно; 5 и 6 — точки, позволяющие определить индикаторную мощность при энергетическом анализе.

В стандартной методике расчета при построении СИД относительные потери давления газа во всасывающем $\delta_{вс}$ и нагнетательном δ_n клапанах определяют по выражениям [6–10]

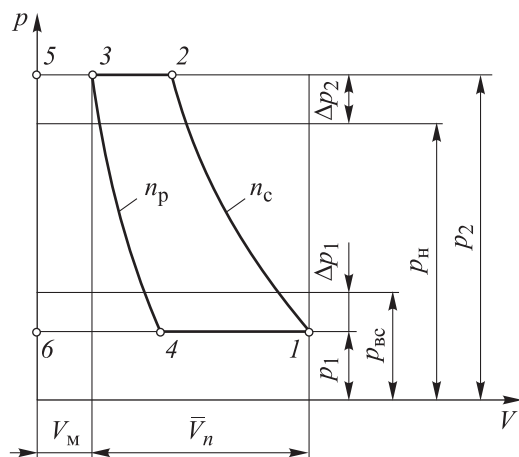


Рис. 1. Упрощенная СИД действительного ПК

$$\delta_{вс} = 0,3 \frac{A}{p_{вс}^{0,25}}; \quad (1)$$

$$\delta_n = 0,3 \frac{A}{p_n^{0,25}}, \quad (2)$$

где $p_{вс}$ и p_n — давления всасывания и нагнетания газа; A — коэффициент, учитывающий совершенство ПК, $A = 2,66$.

Усредненные потери давления газа во всасывающем $p_{вс}''$ и нагнетательном p_n'' клапанах вычисляют с учетом относительных потерь давления газа следующим образом:

$$p_{вс}'' = (1 - \delta_{вс}) p_{вс}; \quad (3)$$

$$p_n'' = (1 + \delta_n) p_n. \quad (4)$$

Согласно выражениям (3) и (4), потери давления газа в органах газораспределения находят по универсальной формуле без учета критерия скорости газа в клапане. Однако отсутствие учета критерия скорости газа может существенно повлиять на эти потери и, как следствие, привести к неточному определению индикаторной мощности.

Цель работы — сравнительный анализ СИД, построенных по стандартной методике и с учетом критерия скорости газа.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выступали СИД ПК, построенные без учета и с учетом критерия скорости газа $M = 0,22; 0,20; 0,18; 0,16; 0,14; 0,12$ и $0,10$. Принято, что клапан всасывания открывается при угле 0° и закрывается при 180° , а клапан нагнетания соответственно при 180 и 360° . Отношение давлений в ПК $\varepsilon = 3$.

Методика расчета потерь давления газа в органах газораспределения с учетом критерия скорости газа. Относительные потери давления газа с учетом критерия скорости газа определяем по выражению [8]

$$x = \frac{k\pi^2}{8} \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)^2 M^2, \quad (5)$$

где k — показатель адиабаты; φ — угол поворота коленчатого вала; λ — отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Подставляя в выражение (5) значения критерия скорости газа во всасывающем и нагнетательном клапанах, получают относительные

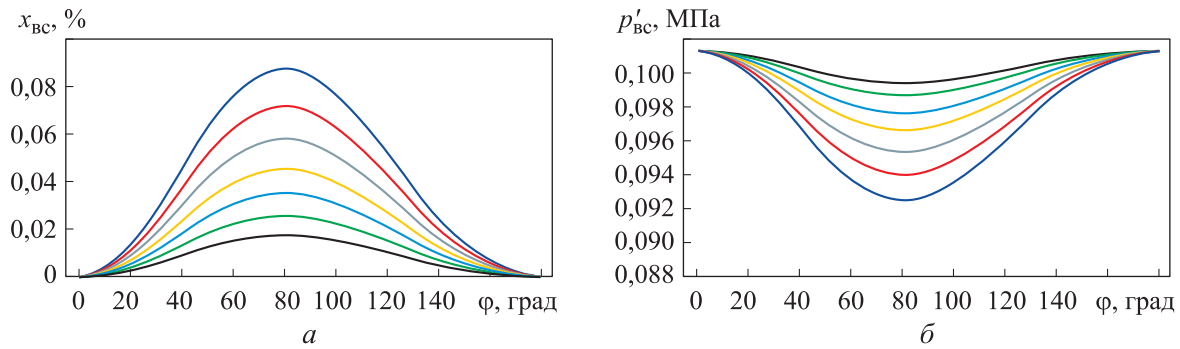


Рис. 2. Зависимости относительных $x_{вс}$ (а) и усредненных $p'_{вс}$ (б) потерь давления газа во всасывающем клапане от угла поворота коленчатого вала φ при критерии скорости газа $M = 0,10$ (—), $0,12$ (—), $0,14$ (—), $0,16$ (—), $0,18$ (—), $0,20$ (—) и $0,22$ (—)

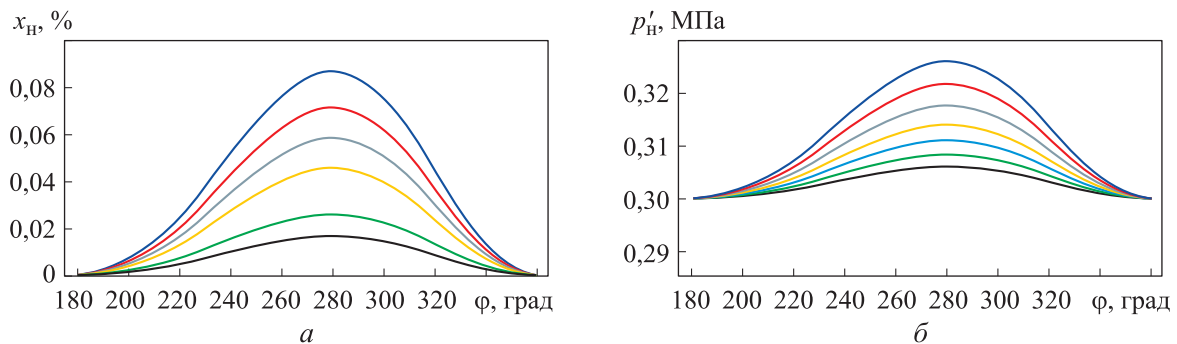


Рис. 3. Зависимости относительных x_n (а) и усредненных p'_n (б) потерь давления газа в нагнетательном клапане от угла поворота коленчатого вала φ при критерии скорости газа $M = 0,10$ (—), $0,12$ (—), $0,14$ (—), $0,16$ (—), $0,18$ (—), $0,20$ (—) и $0,22$ (—)

тельном клапанах, получаем соответствующие относительные потери давления газа $x_{вс}$ и x_n с учетом критерия скорости газа [11–15].

По формулам (1) и (2) находим относительные потери во всасывающем $\delta_{вс}$ и нагнетательном δ_n клапанах без учета критерия скорости газа и после их подстановки в выражения (3) и (4) получаем соответствующие усредненные потери давления газа $p''_{вс}$ и p''_n .

Используя значения относительных потерь давления газа $x_{вс}$ и x_n , определенные с учетом критерия скорости газа, находим усредненные потери давления газа во всасывающем $p'_{вс}$ и нагнетательном p'_n клапанах по следующим выражениям:

$$p'_{вс} = (1 - x_{вс}) p_{вс};$$

$$p'_n = (1 + x_n) p_n.$$

По вычисленным величинам строим СИД и с помощью планометрирования определяем индикаторную мощность.

Результаты исследования. Полученные для всасывающего клапана зависимости относительных и усредненных потерь давления газа

от угла поворота коленчатого вала φ при критерии скорости газа $M = 0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20$ и $0,22$ приведены на рис. 2, а и б, а для нагнетательного клапана — на рис. 3, а и б.

По полученным результатам расчета построена упрощенная СИД ПК с учетом потерь давления газа при различных значениях критерия скорости, показанная на рис. 4, где V_h — рабочий объем.

Определенные методом планометрирования площади СИД усредненных потерь газа, относительная погрешность площадей, рассчитан-

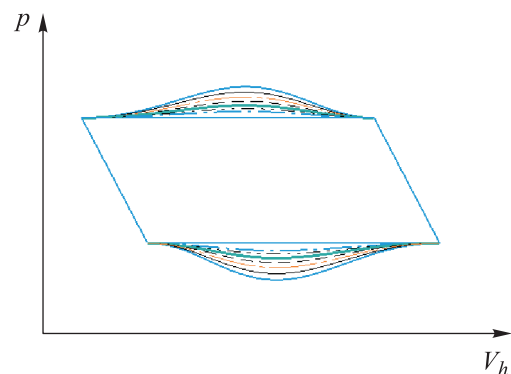


Рис. 4. Упрощенная СИД ПК

Результаты расчетов

Критерий скорости газа	Площадь СИД усредненных потерь, мм ²	Относительная погрешность, %	Суммарная относительная погрешность, %
0,10	11 287,14/10 387,94	–3,64/–1,78	5,42
0,12	11372,69/10 314,56	–4,43/–1,06	5,49
0,14	11 451/10 248,76	–5,15/–0,42	5,56
0,16	11 521,16/10 189,65	–5,79/0,16	5,63
0,18	11 582,27/10 137,23	–6,35/0,67	5,68
0,20	11 636,13/10 060,9	–6,85/1,42	5,43
0,22	11 680,94/10 054,26	–7,26/1,48	5,78
Без учета критерия скорости газа	10 890,00/10 205,90	0	0
Примечание. В числителе дроби указаны значения на всасывании, в знаменателе — на нагнетании.			

ных по стандартной методике и с учетом критерия скорости, и суммарная относительная погрешность приведены в таблице. Там же указаны значения, вычисленные по стандартной методике.

Выводы

1. Анализ результатов исследования показал, что погрешность между данными, вычисленными с учетом критерия скорости газа и по стандартной методике, в среднем составляет 5,57 %, что может существенно повлиять на

точность расчета ПК большой производительности.

2. Установлено при учете критерия скорости газа для всасывающего клапана усредненные потери газа на 3,6...7,2 % больше, чем вычисленные по стандартной методике. Для клапанов нагнетания учет критерия скорости газа менее выразительный. При критерии скорости 0,10...0,14 усредненные потери давления газа больше, чем рассчитанные по стандартной методике, а при критерии скорости газа 0,16...0,22 — меньше.

Литература

- [1] Очков А.А. Перспектива создания современных высоковакуумных механических насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 103–137, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-103-137>
- [2] Никитин О.Ф. Влияние давления на выходе из дросселирующего элемента на коэффициенты истечения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 125–138, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-125-138>
- [3] Щерба В.Е. *Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия*. Москва, Юрайт, 2023. 323 с.
- [4] Пронин В.А., Кованов А.В., Цветков В.А. и др. Оценка степени влияния фактора подвижности стенок щели при расчете величины протечек в рабочей части спирального компрессора. Часть 1. *Омский научный вестник. Сер. Авиацонно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 9–17, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-9-17>
- [5] Исаев А.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. и др. Исследование перетеканий в двухроторном вакуумном насосе типа Рутс с эллиптическим профилем роторов при молекулярном режиме течения газа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 4, с. 38–45, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-4-38-45>
- [6] Грезин А.К., Зиновьев В.С. *Микрокриогенная техника*. Москва, Машиностроение, 1977. 232 с.
- [7] Юша В.Л., Бусаров С.С. и др. 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: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18>
- [8] Бусаров С.С., Гошля Р.Ю., Громов А.Ю. и др. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора. *Компрессорная техника и пневматика*, 2016, № 6, с. 6–10.
- [9] Архаров А.М. и др. *Криогенные поршневые детандеры*. Москва, Машиностроение, 1974. 240 с.
- [10] Дорофеев Е.А., Тегжанов А.Х.С., Щерба В.Е. Анализ безнасосных систем охлаждения поршневых компрессоров. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 32–39, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-32-39>
- [11] Nedovenchanyi A.V., Yusha V.L., Busarov S.S. Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases. *Chem. Petrol. Eng.*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 593–597, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0520-1>
- [12] Новиков И.И., ред. *Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах*. Ленинград, Машиностроение, 1981. 238 с.
- [13] Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu. Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 53, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>
- [14] Омран М., Жарковский А.А., Щур В.А. и др. Методика проектирования и оптимизации лопастной системы радиально-осевой гидротурбины. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54>
- [15] Юша В.Л., Громов А.Ю., Ушаков П.В. Анализ влияния температурных режимов поршневой длинноходовой компрессорной ступени на термодинамическую эффективность теплового насоса. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 18–25, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25>

References

- [1] Ochkov A.A. Prospects for developing modern high-vacuum mechanical pumps. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2022, no. 1, pp. 103–137, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-1-103-137> (in Russ.).
- [2] Nikitin O.F. Effect of throttle output pressure on discharge coefficients. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 6, pp. 125–138, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-6-125-138> (in Russ.).
- [3] Shcherba V.E. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye porshnevykh kompressorov obemnogo deystviya* [Theory, calculation and design of reciprocating positive displacement compressors]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 323 p. (In Russ.).
- [4] Pronin V.A., Kovanov A.V., Tsvetkov V.A. et al. Assessment of the influence of gap wall mobility factor at calculation of leakage in working section of a scroll compressor. Part 1. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 9–17, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-9-17> (in Russ.).
- [5] Isaev A.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. et al. Study of the backward flow in Roots-type vacuum pump with elliptical rotor profile in the gas flow molecular regime. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 4, pp. 38–45, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-4-38-45> (in Russ.).
- [6] Grezin A.K., Zinovyev V.S. *Mikrokriogennaya tekhnika* [Microcryogenic technique]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977. 232 p. (In Russ.).

- [7] Yusha V.L., Busarov S.S. et al. Experimental study of working processes of low-speed long-stroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2018, vol. 2, no. 2, pp. 13–18, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18> (in Russ.).
- [8] Busarov S.S., Goshlya R.Yu., Gromov A.Yu. et al. Mathematical modelling of heat exchange processes in the working chamber of a low-speed stage of a reciprocating compressor. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2016, no. 6, pp. 6–10. (In Russ.).
- [9] Arkharov A.M. et al. *Kriogennyye porshnevyye detandery* [Cryogenic reciprocating piston detanders]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 240 p. (In Russ.).
- [10] Dorofeev E.A., Tegzhanov A.Kh.S., Shcherba V.E. The analysis of pumpless cooling systems reciprocating compressors. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 32–39, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-32-39> (in Russ.).
- [11] Nedovenchanyi A.V., Yusha V.L., Busarov S.S. Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases. *Chem. Petrol. Eng.*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 593–597, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0520-1>
- [12] Novikov I.I., ed. *Bessmazochnyye porshnevyye uplotneniya v kompressorakh* [Lubricant-free piston seals in compressors]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 238 p. (In Russ.).
- [13] Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu. Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units. *Chem. Petrol. Eng.*, 2017, vol. 53, no. 3, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2>
- [14] Omran M., Zharkovskiy A.A., Shchur V.A. et al. Technique for designing and optimization of the Francis turbine blade system. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54> (in Russ.).
- [15] Yusha V.L., Gromov A.Yu., Ushakov P.V. The analysis of influence of temperature conditions of piston long-stroke compressor stage on thermodynamic efficiency of a heat pump. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 18–25, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.07.2024

Информация об авторах

КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович — аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: roman.kobilsky@gmail.com).

БУСАРОВ Сергей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: ssi1980@mail.ru).

Information about the authors

KOBYLSKY Roman Eduardovich — Postgraduate, Department of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: roman.kobilsky@gmail.com).

BUSAROV Sergei Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Refrigerating and Compressor Engineering and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: ssi1980@mail.ru).

БУСАРОВ Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: habr86@mail.ru).

BUSAROV Igor Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Lecturer, Department of Refrigerating and Compressor Engineering and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: habr86@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С., Бусаров И.С. Учет критерия скорости газа при построении упрощенной схематизированной индикаторной диаграммы действительного компрессора. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 4, с. 69–75.

Please cite this article in English as:

Kobylsky R.E., Busarov S.S., Busarov I.S. Accounting for the gas velocity criterion in constructing a simplified schematized indicator diagram of the real compressor. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 4, pp. 69–75.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию
«Технологические процессы
лазерной поверхностной обработки»**

Авторы: А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров

В монографии в большом объеме рассмотрены лазерные технологические процессы обработки поверхностей металлических деталей и изделий. Описаны технологии лазерной термической обработки сталей, титановых, алюминиевых, медных и других сплавов. Показано влияние параметров режимов непрерывной и импульсной закалки на структуру и получаемые свойства поверхностей. Подробно представлен малоизвестный процесс импульсного ударного упрочнения материалов. Рассмотрены основы физики этого процесса, а также влияние параметров и условий обработки на остаточные напряжения, микроструктуру и механические свойства материала. Большое внимание уделено технологиям модифицирования поверхности лазерным легированием и наплавкой. Приведены результаты исследований и внедренных технологий нанесения порошков из тугоплавких материалов, карбидов и нитридов на поверхность сталей, чугунов и цветных металлов. Показано влияние технологических факторов на структуру, свойства и трещиностойкость нанесенных слоев. Даны физическое представление о процессе лазерного полирования металлических поверхностей различных материалов, а также технология его осуществления.

Для инженерно-технических работников, использующих технологические лазеры, а также для студентов высших учебных заведений машиностроительных специальностей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>