

УДК 621.514

Работа турбокомпрессоров в условиях пониженного давления во всасывающем трубопроводе

Филиппов И. В.^{1,*}

[*fv61@yandex.ru](mailto:fv61@yandex.ru)

¹Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Одним из перспективных направлений для производства сжатого воздуха на промышленных, в том числе, и горнодобывающих предприятиях является использование турбокомпрессоров. Многие горнодобывающие предприятия России и мира, использующие турбокомпрессоры, расположены в высокогорных районах. Условия эксплуатации турбокомпрессоров при пониженном атмосферном давлении существенно отличаются от регламентированных. В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований в реальных производственных условиях были получены индивидуальные характеристики турбокомпрессора типа 4СІ 425МХ4 серии «СЕНТАС» для фактических условий всасывания, рассчитана фактическая удельная работа по сжатию воздуха и определены возможные способы нормализации работы турбокомпрессоров.

Ключевые слова: турбокомпрессор, пониженное давление, индивидуальная характеристика

Введение

Одним из перспективных направлений для производства сжатого воздуха на промышленных, в том числе, и горнодобывающих предприятиях является использование центробежных компрессорных машин (далее – турбокомпрессор). Турбокомпрессоры имеют неоспоримые преимущества перед традиционно применяющимися в промышленности поршневыми компрессорами, особенно, в области большой производительности [1 - 5]. Поэтому на некоторых горнодобывающих предприятиях установлены и эксплуатируются турбокомпрессора различных типов отечественного и зарубежного производства. Многие горнодобывающие предприятия России и мира расположены в высокогорных районах, что, несомненно, сказывается на работе турбокомпрессоров.

1. Постановка задачи

Проблемы эксплуатации компрессорных установок даже при условиях близких к паспортным всегда были предметом исследований [6, 7]. Однако условия эксплуатации

турбокомпрессоров при пониженном атмосферном давлении существенно отличаются от паспортных. Это и стало предметом исследования, результаты которых приведены в статье. В качестве объекта исследований были приняты турбокомпрессоры типа 4СІ 425МХ4 серии «СЕНТАС» производства фирмы INGERSOL –RAND [8], установленные в своё время на руднике «Молибден», а также на некоторых других предприятиях, входящих в компании «РусАл» – ОАО «Севералюкситруда» и в ГМК «НорНикель». Наибольшие проблемы возникли на первом, из указанных предприятий. Это привело к необходимости проведения теоретических и экспериментальных исследований, всестороннему анализу полученных результатов и постановке задачи по разработке способов решения возникшей проблемы. Исследований в области изучения работы турбокомпрессоров в высокогорных условиях практически не проводилось. Результаты теоретических исследований встречаются только в работе Баранникова Н.М. [6], а о практических исследованиях вообще не упоминается.

2. Исходные данные

Особенности эксплуатации турбокомпрессоров типа 4СІ 425МХ4 на руднике «Молибден» можно сформулировать следующим образом:

- альтитуда расположения компрессорной станции составляет 2039 метров над уровнем моря;
- рудник расположен в отрогах Главного Кавказского хребта на границе двух климатических областей: умеренно тёплый климат Северного Кавказа и субтропический климат Закавказья;
- климатическая обстановка характеризуется экстремальными условиями (при минимально возможном атмосферном давлении $p_{\text{атм.экстр.}} = 77\,500$ Па наблюдается максимально возможная температура атмосферного воздуха $T_{\text{атм.экстр.}} = 289$ К), вероятность которых составляет 0,11 [9].

Таким образом, появилась уникальная возможность произвести натурные исследования реального турбокомпрессора в условиях высокогорья со сложной климатической обстановкой. Создать искусственно такие условия для испытаний крайне сложно.

Турбокомпрессор типа 4СІ 425МХ4 представляет собой четырех ступенчатую компрессорную машину с возможностью установки пятой дополнительной ступени (при необходимости) и имеет основные технические характеристики (паспортные), представленные в табл. 1 [10-12].

Таблица 1. Технические характеристики компрессор типа 4CI 425MX4

Параметры	Паспортное значение
Параметры всасываемого воздуха:	
– температура, К	282
– давление, Па	101 650
– плотность, кг/м ³	1,257
Производительность объёмная, м ³ /мин	437,7
Производительность массовая, кг/мин	550,2
Конечное давление сжатого воздуха, Па	795 650
Степень повышения давления	8,02
Конечная температура сжатия, К	313,5
Мощность на валу компрессора, кВт	2564,0
Удельная мощность, кВт×час/100 м ³	9,762

Практика эксплуатации компрессоров типа 4CI 425MX4 показала, что в высокогорных условиях их работа характеризуется:

- уменьшением производительности;
- изменением степени повышения давления в ступенях и в компрессоре в целом;
- нарушением температурных режимов ступеней;
- уменьшением конечного давления (в летний период имеют место случаи, когда не обеспечивается конечное давление на выходе, что приводит к срабатыванию антипомпажной защиты).

3. Теоретические исследования

В процессе проведения теоретических исследований был произведен регрессионный анализ (при помощи математического пакета Table Curve 2D) индивидуальных характеристик компрессора при паспортных условиях работы [13, 14], в результате которого было получено уравнение:

$$P_{\text{пасп}} = -182,979 + 1,387 * g - 0,0039112329 * g^2 + 4,917 * 10^{-6} * g^3 - 2,3381 * 10^{-9} * g^4, \quad (1)$$

где $P_{\text{пасп}}$ - конечное давление сжатого воздуха, МПа; g – массовая производительность турбокомпрессора, кг/мин.

Пересчет характеристик на фактические условия всасывания, приведенные в табл. 2, был выполнен с учетом коэффициентов, определяемых как отношение фактической плотности воздуха к плотности воздуха при паспортных условиях работы. Результатом расчетов являются характеристики компрессора типа 4CI 425MX4 для различных параметров атмосферного воздуха, которые приведены на рис. 1.

Таблица 2. Параметры атмосферного воздуха

Климатические условия	Атмосферное давление, Па	Температура атмосферного воздуха, К	Плотность атмосферного воздуха, кг/м ³
Среднегодовые	79 000	273	1,009
Зимний период	78 750	266	1,033
Летний период	79 420	284	0,975
Экстремальные	77 500	289	0,935

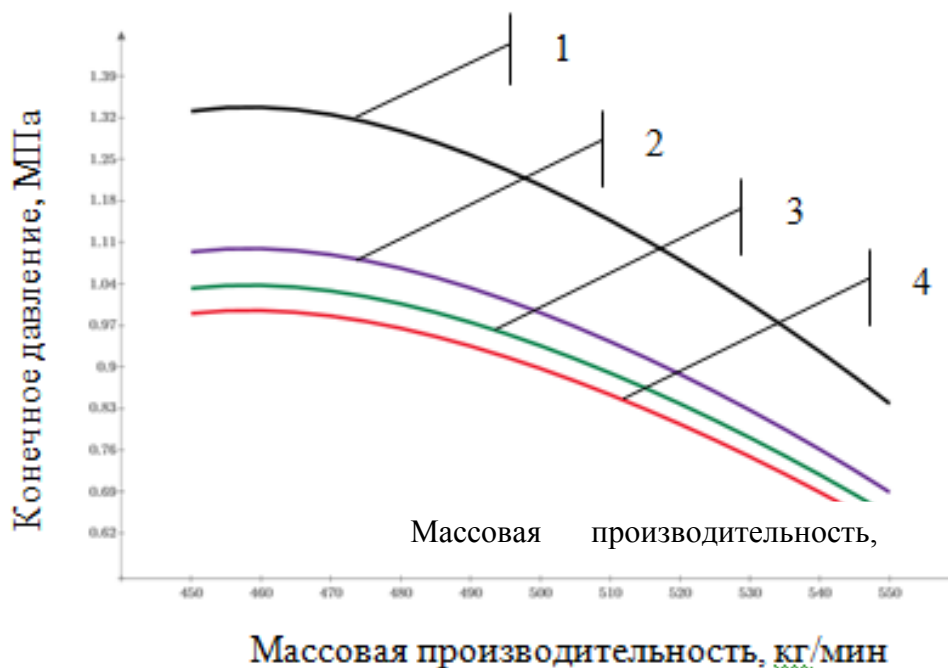


Рис. 1. Характеристики компрессора типа 4CI 425MX4: 1 – для паспортных условий работы; 2, 3 и 4 – соответственно, для зимних, летних и экстремальных условий работы

Представленные характеристики получены аналитическим путём и требуют экспериментальной проверки, которая в дальнейшем и была проведена в реальных условиях. Однако, анализируя результаты теоретических исследований, уже можно говорить о негативном влиянии на работу турбокомпрессоров, в первую очередь, пониженного атмосферного давления:

- массовая и объёмная производительность, приведённая к паспортным условиям всасывания, уменьшается на 16...22 %;
- при экстремальных условиях снижение производительности достигает 25 %;
- в летний период возможен режим работы турбокомпрессора, когда не обеспечивается требуемое конечное давление.

4. Экспериментальные исследования

Фактические индивидуальные характеристики компрессора типа 4CI 425MX4 были получены в результате экспериментальных исследований. Испытания были проведены в летний (июль) и зимний (февраль) периоды при следующей климатической обстановке:

– летний период: атмосферное давление – 79 400 Па, температура атмосферного воздуха – 286 К;

– зимний период: атмосферное давление – 78 600 Па, температура атмосферного воздуха – 268 К.

Экспериментальные исследования проводились в промышленных условиях в виде пассивного эксперимента. Все измерения осуществлялись с помощью штатного измерительного комплекса, входящего в комплект системы управления и контроля турбокомпрессора типа 4СІ 425МХ4. Обработка результатов измерений произведена в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (части 1 и 6).

Полученные индивидуальные характеристики приведены на рис. 2. На этом же рисунке для сравнения приведены характеристики, полученные аналитическим способом по выражению (1) при вышеуказанных климатических условиях.

Как видно из рис. 2, индивидуальные характеристики турбокомпрессора, полученные экспериментальным путем, отличаются от теоретических, хотя и незначительно. Это объясняется тем, что реальные условия работы характеризуются не только изменением условий всасывания, но условиями промежуточного охлаждения сжимаемого воздуха в ступенях.

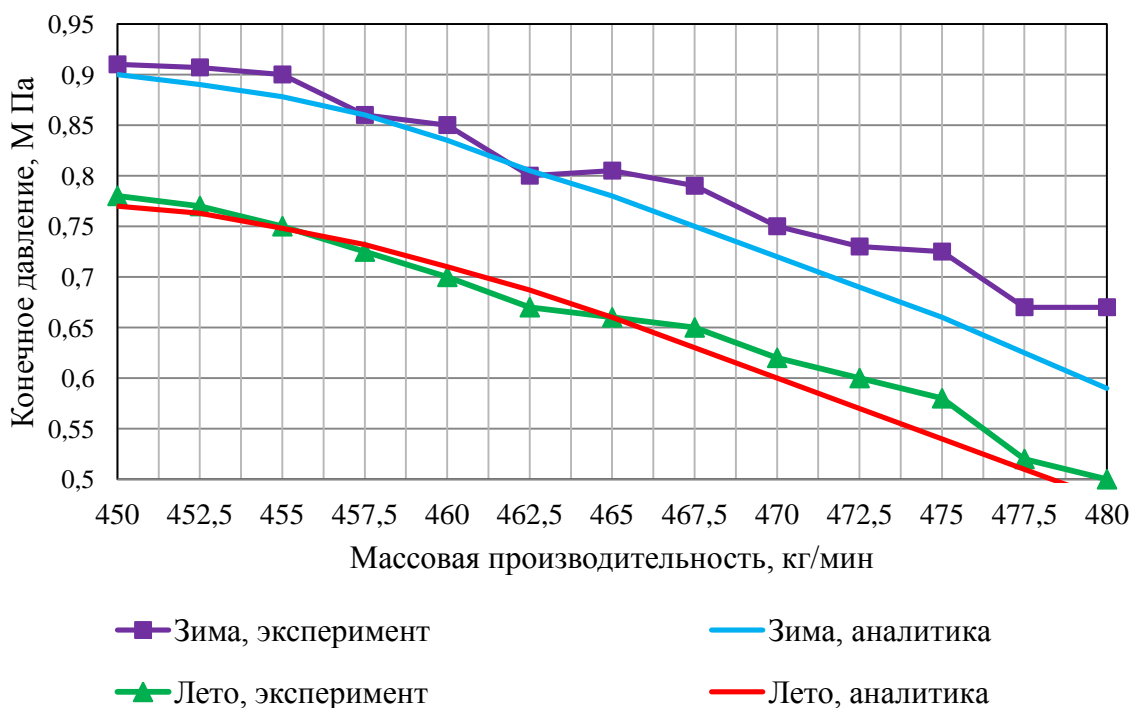


Рис. 2. Индивидуальные характеристики компрессора типа 4СІ 425МХ4, полученные экспериментально и аналитическим способом

Во время проведения экспериментальных исследований также контролировались температурные режимы в ступенях турбокомпрессора, определялись степени повышения

давления и массовая производительность турбокомпрессора. Сравнительные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3. Паспортные и экспериментальные значения параметров турбокомпрессора типа 4С1 425МХ4

Параметры	Паспортные значения	Экспериментальные значения	
		лето	зима
Параметры атмосферного воздуха: – температура, К – давление, Па	282 101 650	286 79 400	268 78 600
Температура воздуха после: – 1 ступени, К – 2 ступени, К – 3 ступени, К – 4 ступени, К	363 358 358 353	378 373 378 373	365 363 368 365
Степени повышения давления в: – 1 ступени – 2 ступени – 3 ступени – 4 ступени	2,1336 1,6567 1,6046 1,4141	2,1603 1,8210 1,6121 1,6113	2,3008 1,7231 1,6164 1,5824
Производительность: – массовая, кг/мин – в % от паспортной	532 100	416 78,2	446 83,8

Из приведённых данных видно, что фактические температурные режимы в ступенях отличаются от паспортных, происходит увеличение значений конечной температуры сжатого воздуха в ступенях, а, следовательно, и изменение показателей политропы сжатия.

Оценить экономичность работы турбокомпрессора можно по величине удельной работы по сжатию воздуха. Величина удельной работы определяется из выражения [4, 15]

$$l_k = R \frac{k}{k-1} \sum_{i=1}^4 \left[T_{в,i} \left(e_i^{\frac{n_i-1}{n_i}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где l_k – удельная работа компрессора, Дж/кг; R – газовая постоянная, Дж/кг×К; $T_{в,i}$ – температура воздуха на входе в i – ступень, К; k – показатель адиабаты; ε_i – степень повышения давления в i – ступени; n_i – показатель политропы в i – ступени.

В расчетах были использованы паспортные данные и данные, полученные экспериментальным путём (табл. 3). Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4. Удельная работа компрессора

Условия работы	Удельная работа	
	Дж/кг	в % к паспортной
Паспортные	192 700	100,0
Зимний период	216 800	112,5
Летний период	227 300	118,0

Представленные в табл. 4 данные свидетельствуют о том, что при эксплуатации турбокомпрессоров в высокогорных условиях удельная работа по сжатию воздуха увеличивается на 12...18 % и, следовательно, уменьшается к.п.д. компрессорной установки в целом.

Расчеты для среднегодовых и экстремальных климатических условий (табл. 2) показали, что увеличение удельной работы по сжатию воздуха составляет 14 % и 21 %, соответственно.

Заключение

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сделать следующие выводы:

- высокогорные условия и сезонные колебания параметров атмосферного воздуха оказывают негативное влияние на работу турбокомпрессоров;
- фактические показатели работы турбокомпрессоров существенно отличаются от паспортных;
- величина удельной работы как показатель экономичности превышает паспортное значение на 12...21 % в зависимости от климатических условий.

Задача нормализации работы турбокомпрессоров в высокогорных условиях представляется актуальной не только для рассмотренного типа компрессора большой мощности, но и для машин средней и малой мощности. В конкретном случае было принято решение о рассмотрении двух способов:

- закупка и установка пятой дополнительной ступени (для турбокомпрессора типа 4СІ 425МХ4 такая возможность предусмотрена конструкцией);
- механический наддув во всасывающем трубопроводе при помощи воздуходувок большой мощности.

Для принятия окончательного решения необходимо провести исследования не только технические, но и экономические: оценить прямые и косвенные расходы при реализации указанных способов.

Список литературы

1. Girsberger R., Feld H.-J., Kudermasch G., Rofka C., Lindblom C. Low noise turbochargers // CIMAC Congress 2004, Kyoto, 2004. Paper no. 84.
2. Klima J., Martin V., Tomec O. High Performance Small Turbocharges // CIMAC Congress 2010, Bergen, 2010. Paper no. 188.
3. Лобода Б.Н., Огнев В.В., Образцов В.И., Гительман А.И., Хазов И.Н. Пильдиш В.Г. Создание и внедрение многоцелевых унифицированных турбокомпрессорных машин для различных отраслей промышленности и транспорта // Компрессорная техника и пневматика. 2006. № 6. С. 20-22.
4. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. Л.: Машиностроение, 1981. 270 с.
5. Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И. Турбокомпрессоры: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 374 с.
6. Баранников Н.М. Повышение эффективности рудничных компрессорных станций. М.: Недра, 1972. 232 с.

7. Азовцев А.Б., Вейраух А.Н., Недоступ В.Д. О проблемах эксплуатации компрессорных установок // Компрессорная техника и пневматика. 2006. № 2. С. 28-29.
8. Шерченков П.В. Центробежные компрессоры «ЦЕНТАК» // Территория Нефтегаз. 2007. № 6. С. 76-79.
9. Филиппов И.В. Влияние изменений давления и температуры атмосферного воздуха на работу компрессоров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1987. № 6. С. 89-91.
10. Булавин Д.О. Центробежные турбокомпрессоры фирмы «INGERSOLL-RAND»: Сочетание современных технологий с высоким качеством продукции // Технические газы. 2001. № 3. С. 45-50
11. Лавреченко Г.К., Власюк В.А., Булавин Д.О. Воздушные компрессоры компании «Ингерсолл-Рэнд»: от первых шагов – к непревзойденному успеху // Компрессорная техника и пневматика. 2002. № 7. С. 21-23.
12. Лавреченко Г.К., Швец С.Г., Булавин Д.О. Особенности и характеристики типоразмерных рядов воздушных винтовых компрессоров компании «Ингерсолл-Рэнд» // Компрессорная техника и пневматика. 2003. № 7. С. 24-25.
13. Шамеко С.Л., Любимов А.Н., Гаман Е.В. К пересчёту газодинамических характеристик многоступенчатой проточной части ЦКМ на иные условия работы // Компрессорная техника и пневматика. 2010. № 3. С. 28-31.
14. Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчет и проектирование проточной части. М.: КХТ, 2010. 596 с.
15. Добродеев В.П., Добродеев А.В. Метод оценки параметров и эффективности процесса сжатия газа в турбокомпрессорах // Компрессорная техника и пневматика. 2001. № 8. С. 22-25.

Work Turbochargers under Reduced Pressure in the Suction Pipe

I.V. Filippov.^{1,*}

[*fiv61@yandex.ru](mailto:fiv61@yandex.ru)

¹Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

Keywords: turbocharger, low pressure, individual characteristics

In case consumers have a significant need in the compressed air, the use of turbochargers is a promising direction. The turbocharger operation is largely defined by its running conditions, namely parameters of the intake air and cooling conditions.

The paper presents the results of experimental studies of turbochargers type 4CI 425MX4 of series "CENTAC" manufactured by INGERSOL-RAND, which were performed under industrial conditions in a mountainous area with difficult climatic conditions. There were, essentially, no researches of running turbochargers in mountainous areas. The combination of low atmospheric pressure, high temperature of intake air, and specific cooling conditions causes abnormal mode of turbocharger operation. The results of theoretical studies of such modes are found only in N.M. Barannikov's work while there is no mentioned empirical research at all.

Experimental studies were conducted under industrial conditions in the form of passive experiment. All measurements were carried out using a standard measuring system included in the system of compressor monitor and control. During the experimental studies temperature regimes at the turbocharger stage were controlled, and turbocharger pressure ratio and weight output were determined.

The results of the research can be formulated as follows:

- highland conditions and seasonal variations of atmospheric air have a negative impact on the operation of the turbochargers;
- specific work value as an indicator of the economical efficiency exceeds that of the nameplate by 12...21 % depending on the climatic conditions.

The problem of functioning normalization of the turbochargers seems to be relevant not only for the considered type of compressor, but also for that of the less power. It is proposed to consider two ways:

- installation of the fifth additional stage;
- mechanical pressurization in the suction pipe by means of blowers of high power.

To make final decision it is necessary to conduct not only technical, but also economical researches: to estimate direct and indirect costs when using the aforementioned methods.

References

1. Girsberger R., Feld H.-J., Kudermasch G., Rofka C., Lindblom C. Low noise turbochargers. *CIMAC Congress 2004*, Kyoto, 2004, paper no. 84.
2. Klima J., Martin V., Tomec O. High Performance Small Turbochargers. *CIMAC Congress 2010*, Bergen, 2010, paper no. 188.
3. Loboda B.N., Ognev V.V., Obraztsov V.I., Gitel'man A.I., Khazov I.N. Pil'dish V.G. Creation and implementation of standardized multipurpose turbocompressor machines for various industries and transport. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2006, no. 6, pp. 20-22. (in Russian).
4. Ris V.F. *Tsentrobezhnnye kompressornye mashiny* [Centrifugal compressor machines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1981. 270 p. (in Russian).
5. Galerkin Yu.B., Kozachenko L.I. *Turbokompressory* [Turbochargers]. St. Petersburg, St.Petersburg Polytechnic University Publ., 2008. 374 p. (in Russian).
6. Barannikov N.M. *Povyshenie effektivnosti rudnichnykh kompressornykh stantsiy* [Improving the efficiency of mine compressor stations]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 232 p. (in Russian).
7. Azovtsev A.B., Veyraukh A.N., Nedostup V.D. Problems of operation of compressor units. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2006, no. 2, pp. 28-29. (in Russian).
8. Sherchenkov P.V. Centrifugal compressors "TSENTAK". *Territoriya Neftegaz*, 2007, no. 6, pp. 76-79. (in Russian).
9. Filippov I.V. The effects of changes of atmospheric air pressure and temperature on compressors operation. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1987, no. 6, pp. 89-91. (in Russian).
10. Bulavin D.O. Centrifugal turbochargers of "INGERSOLL-RAND" company: the combination of modern technology with high quality products. *Tekhnicheskie gazy*, 2001, no. 3, pp. 45-50. (in Russian).
11. Lavrechenko G.K., Vlasyuk V.A., Bulavin D.O. Air compressors of "Ingersoll-Rand" company: from the first steps - to the unmatched success. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2002, no. 7, pp. 21-23. (in Russian).
12. Lavrechenko G.K., Shvets S.G., Bulavin D.O. Features and characteristics of standard series of air screw compressors of "Ingersoll-Rand" company. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2003, no. 7, pp. 24-25. (in Russian).
13. Shameko S.L., Lyubimov A.N., Gaman E.V. To the gas dynamic characteristics conversion of the centrifugal compressor multistage setting from some conditions to other ones. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2010, no. 3, pp. 28-31. (in Russian).

14. Galerkin Yu.B. *Turbokompressory. Rabochiy protsess, raschet i proektirovanie protochnoy chasti* [Turbochargers. Workflow, calculation and design of liquid end]. Moscow, KKhT Publ., 2010. 596 p. (in Russian).
15. Dobrodeev V.P., Dobrodeev A.V. The method of estimation of parameters and efficiency of process of gas compression in turbocharger. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors and Pneumatics*, 2001, no. 8, pp. 22-25. (in Russian).