

СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МЕТАНОВЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТИХОХОДНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

С. С. Бусаров¹, И. С. Бусаров¹, А. В. Недовенчаный¹,
Р. Э. Кобыльский¹, А. А. Капелюховская¹, Е. В. Заушицын¹,
А. Е. Гаглоева¹, А. Ю. Громов²

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

²АО НТК «Криогенная техника»,
Россия, 644105, г. Омск, ул. 22 Партсъезда, д. 97, корп. 1

В данной статье представлены результаты проведенного комплекса работ по адаптации существующей математической модели расчета рабочих процессов тихоходных компрессорных ступеней для сжатия метана и создания инженерной методики расчета производительности ступени на основании полученных экспериментальных данных.

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

Введение

Метан очень широко используется в различных отраслях промышленности. В качестве топлива как в стационарных установках для получения энергии, так и в передвижных метан стал широко применяться с середины XX века как альтернатива жидким топливам за счёт своей дешевизны и экологичности [1, 2].

В холодильной технике применение метана возможно как низкотемпературного хладагента в каскадных холодильных машинах [3–5].

Транспортировка метана в газообразном виде нецелесообразна. Для эффективного его использования применяют специальные баллоны, где газ сжат до 20–25 МПа (200–250 атмосфер) [6].

Для получения таких давлений используют многоступенчатые бесшмазочные компрессорные установки, имеющие до шести ступеней сжатия. Альтернативным компрессором для закачки метана в баллоны могут стать агрегаты на базе тихоходных компрессорных ступеней, где для получения давлений до 25 МПа достаточно всего двух-трех ступеней сжатия [7, 8].

В настоящее время отсутствует методика расчета таких ступеней при сжатии метана. Поэтому получение экспериментальных данных по параметрам рабочего процесса тихоходных длинноходовых поршневых ступеней при сжатии метана — актуальная задача, при решении которой и на основании полученных данных будет разработана инженерная методика расчета.

Объект исследования

Экспериментальные исследования рабочего процесса тихоходной ступени поршневого компрессора выполнены на стенде и по методике, описанной

в [9–14]. 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;
- физические условия: сжимаемый газ — метан; температура газа на всасывании — 292 К, давление всасывания — 0,15...0,2 МПа, давление нагнетания — до 3 МПа; время рабочего цикла — 2–4 с.

Экспериментальные исследования

На рис. 1, 2 представлены: измерительная схема и фотография стенда.

Экспериментальный стенд работает следующим образом. После запуска гидравлической станции работает приводной гидроцилиндр, жидкость попеременно подается то в одну, то в другую полость, обеспечивая поступательное движение системы шток — поршень, переключение в гидрораспределителе осуществляется подачей сигналов с концевых датчиков (герконов). На всасывание метан подается из баллона через редуктор под давлением 0,15...0,2 МПа. Показания, получаемые с датчиков через блок сбора данных, через усилитель выводятся на электронный осциллограф. Более подробно методика измерения с описанием датчиков и погрешностей измерения представлена в работах [10].

На рис. 3–5 представлены примеры результатов экспериментального исследования. Осциллограмма желтого цвета показывает изменение давления в рабочей камере, зеленого цвета — расход газа, а салатового цвета — температуру газа в рабочей камере.

На рис. 6–8 представлены обработанные данные экспериментального исследования по определению средней температуры нагнетаемого газа,

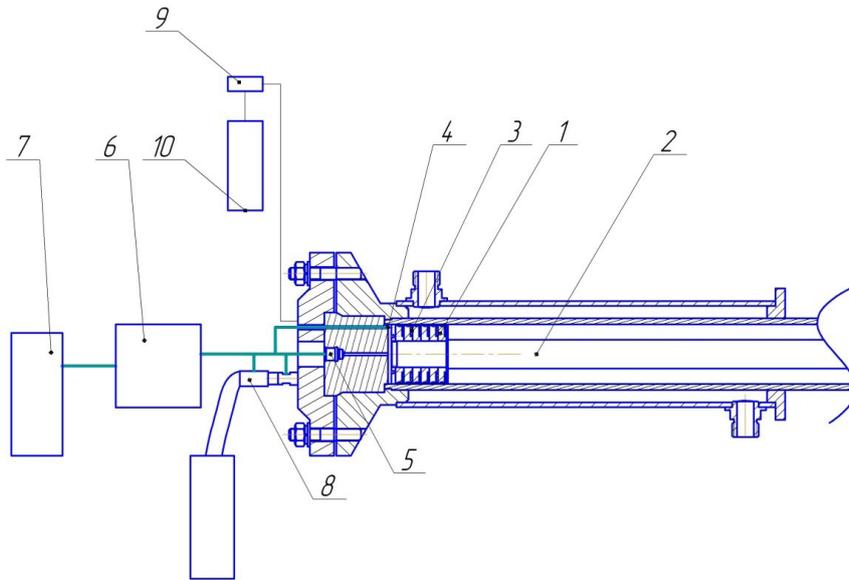


Рис. 1. Схема стенда
 Fig. 1. The scheme of the stand

коэффициента подачи и индикаторного изотермического КПД. При этом проведена верификация математической модели, созданной для моделирования тихоходных компрессорных ступеней [15].

На основании полученных экспериментальных данных было получено эмпирическое уравнение для расчёта коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры при сжатии метана:

$$\alpha = \lambda \cdot (\rho/\mu)^{0,35} W^{0,35} D^{0,65}_{\text{ЭКВ}} \quad (1)$$

Данное уравнение может быть использовано в математической модели рабочего процесса тихоходной поршневой ступени [16, 17].

Создание инженерной методики расчета

Методика расчета производительности малорасходных длинноходных компрессорных ступеней при сжатии метана с давлением нагнетания до 3,0 МПа основана на известных принципах схематизации рабочих процессов и разделения потерь производительности. Данный метод был применен ранее при проведении работ по созданию инженерной методики расчета производительности воздушной малорасходной тихоходной поршневой ступени [18, 19].

Метод определения коэффициента подачи основан на известной зависимости [6]:

$$\lambda = \lambda_o \cdot \lambda_{gp} \cdot \lambda_T \cdot \lambda_{вЛ} \cdot \lambda_{пл} \quad (2)$$

где λ_o — объемный коэффициент, λ_{gp} — коэффициент дросселирования, λ_T — коэффициент подогрева, $\lambda_{вЛ}$ — коэффициент влажности, $\lambda_{пл}$ — коэффициент плотности.

Определение индикаторных потерь производительности

Для расчета объемного коэффициента применим существующую методику расчета [6]:

$$\lambda_o = 1 - a_m \left(\left(\frac{P_n}{P_{вс}} \right)^{1/m} - 1 \right) \quad (3)$$

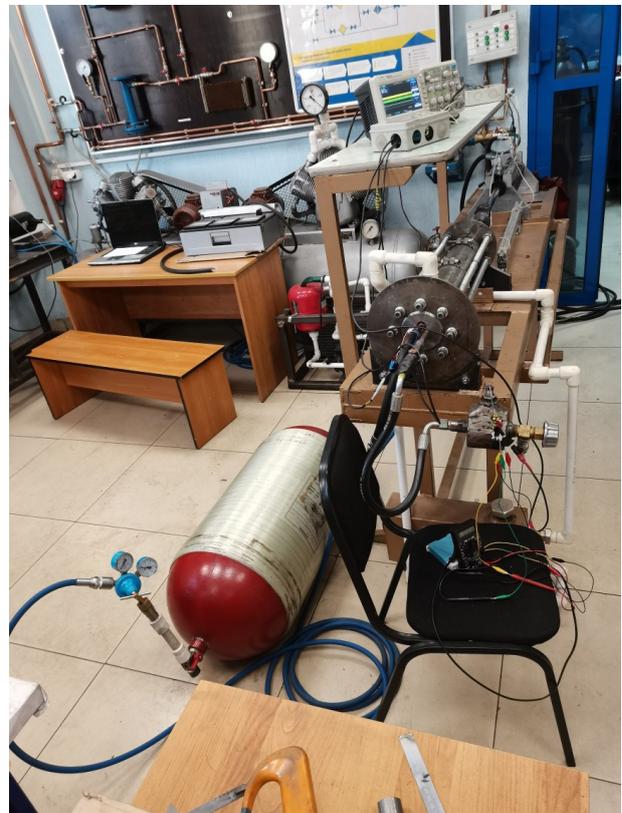


Рис. 2. Фотография стенда
 Fig. 2. Photo of the stand

где $P_{вс}$ — давление всасывания, Па; P_n — давление нагнетания, Па; m — показатель политропы конечных параметров; a_m — величина относительного мертвого объема.

В формуле (3) все величины, кроме m , задаются конструкцией и режимом работы компрессорной ступени. Показатель политропы конечных параметров m определим, используя полученные экспериментальные индикаторные диаграммы. Для этого применим известный принцип схематизации процесса обратного расширения путем замены на индикаторной диаграмме кривой действительно-

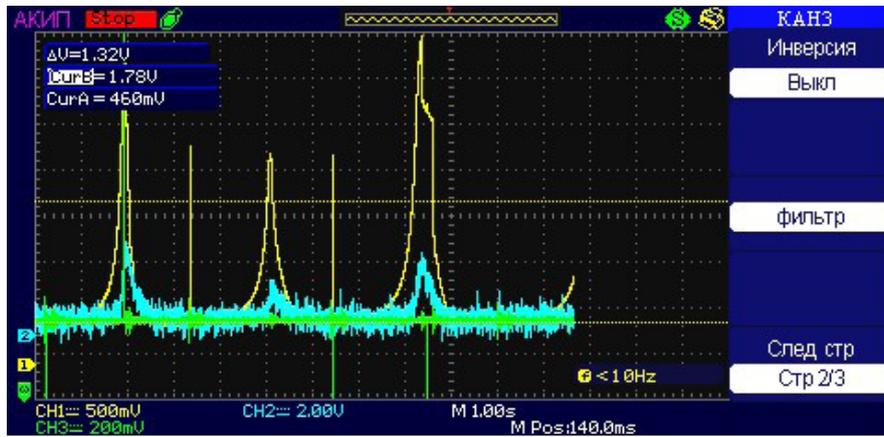


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования (давление и температура в рабочей камере, производительность): $P_n=2$ МПа времени цикла 2 с
 Fig. 3. Results of the experimental study (pressure and temperature in the working chamber, productivity): $P_c=2$ MPa cycle time 2 s

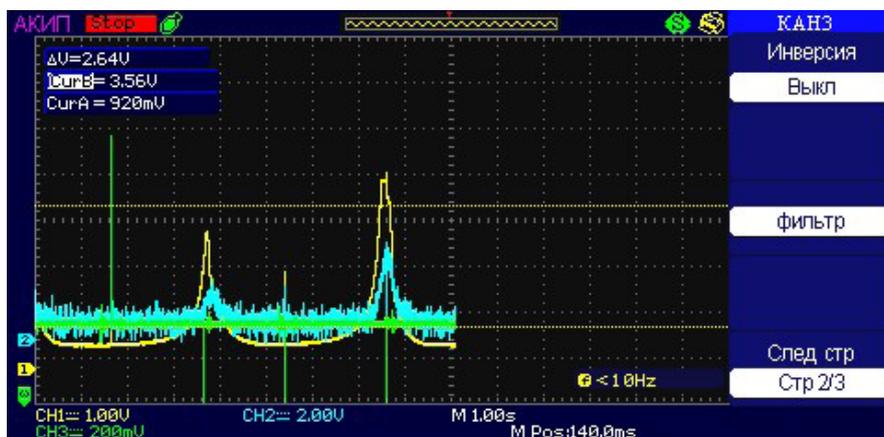


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования (давление и температура в рабочей камере, производительность): $P_n=1$ МПа и времени цикла 4 с
 Fig. 4. Results of the experimental study (pressure and temperature in the working chamber, productivity): $P_c=1$ MPa and cycle time 4 s

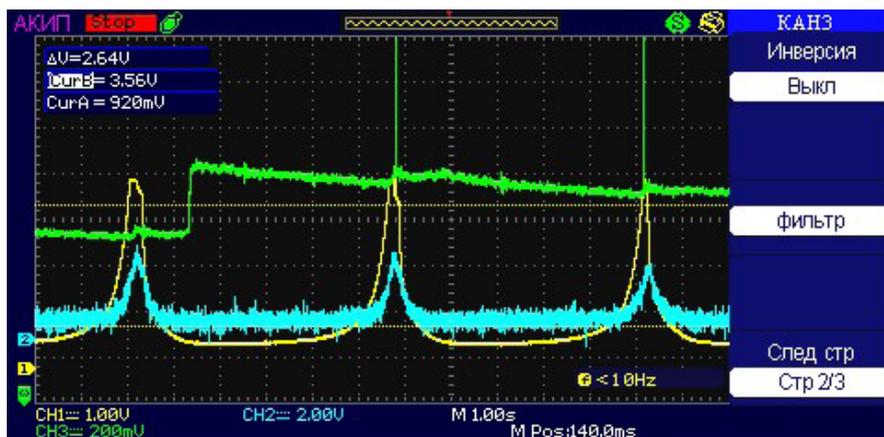


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования (давление и температура в рабочей камере, производительность): $P_n=0,8$ МПа и времени цикла 2 с
 Fig. 5. Results of the experimental study (pressure and temperature in the working chamber, productivity): $P_c=0,8$ MPa and cycle time 2 s

го процесса обратного расширения, протекающего с переменным показателем политропы, на кривую с условно постоянным показателем политропы обратного расширения m ; при этом для обеих кривых точки начала и окончания процесса расширения

должны совпадать [6]. В этом случае схематизированный процесс позволяет с допустимой погрешностью (приемлемой) количественно оценить действительные потери производительности, обусловленные расширением газа из мертвого объема.

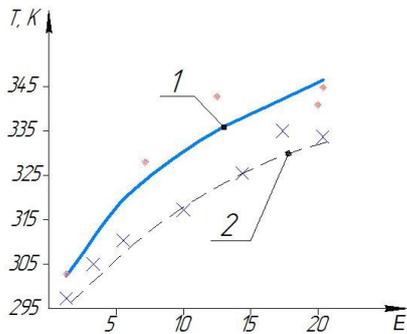


Рис. 6. Зависимость средней температуры нагнетаемого метана от степени повышения давления:
1 — время цикла 2 с; 2 — время цикла 4 с
Fig. 6. Dependence of the average temperature of the injected methane on the degree of pressure increase:
1 — cycle time 2 s; 2 — cycle time 4 s

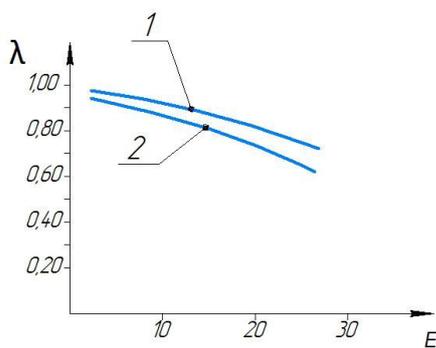


Рис. 7. Зависимость коэффициента подачи от степени повышения давления:
1 — время цикла 2 с; 2 — время цикла 4 с
Fig. 7. The dependence of the feed coefficient on the degree of pressure increase:
1 — cycle time 2 s; 2 — cycle time 4 s

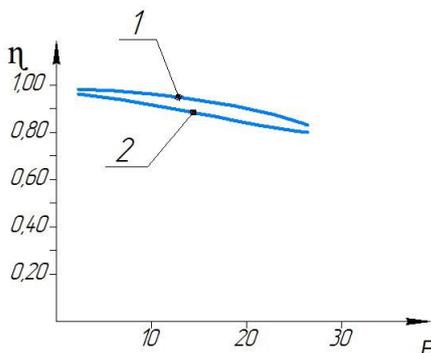


Рис. 8. Зависимость индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления:
1 — время цикла 2 с; 2 — время цикла 4 с
Fig. 8. Dependence of the indicator isothermal efficiency on the degree of pressure increase:
1 — cycle time 2 s; 2 — cycle time 4 s

Согласно известным рекомендациям для расчета показателя политропы конечных параметров можно использовать формулу [6]:

$$m = 1 + A(k - 1), \quad (4)$$

где A — эмпирический коэффициент.

Таблица 1. Индикаторный коэффициент подачи и его составляющие

Table 1. Indicator feed rate and its components

№ эксп.	P_{in} , МПа	Время цикла, с	$\lambda_{инд}$	λ_o	λ_{AP}
1	0,4	3	0,97	0,98	0,99
2	0,8	4	0,96	0,97	0,985
3	1	3	0,93	0,95	0,984
4	2	2	0,93	0,95	0,981

Анализ полученных экспериментальных индикаторных диаграмм (табл. 1) позволяет для рассматриваемой области режимов работы метановой длинноходовой тихоходной ступени предварительно принять следующие рекомендации $A=0,2$ (при этом $m=1,06$). Объемный коэффициент в этом случае изменяется от 0,98 до 0,95 при давлении до 3,0 МПа. При этом значения коэффициента дросселирования лежат в диапазоне 0,98...0,99.

Определение скрытых потерь производительности

Коэффициент подогрева характеризует снижение массы свежей порции всасываемого газа, заполняющего рабочую камеру поршневой в процессе всасывания, за счет его подогрева от поверхностей деталей, формирующих проточную часть ступени, и определяется как отношение температуры метана в стандартной точке всасывания к температуре метана в рабочей камере ступени в конце процесса всасывания [6]:

$$\lambda_T = \frac{T_{вс}}{T_{всп}}, \quad (5)$$

где $T_{вс}$ — температура метана в стандартной точке всасывания, $T_{всп}$ — температура метана в рабочей камере в конце процесса всасывания.

Данную составляющую коэффициента подачи целесообразно определить по результатам экспериментальных исследований, в результате которых были получены температурные диаграммы (рис. 9, 10), позволяющие определить изменение температуры метана в рабочей камере ступени в течение рабочего цикла компрессорной ступени. В табл. 2 представлены результаты обработки полученных экспериментальных данных.

Полученные экспериментальные данные позволили определить температуру газа в конце процесса всасывания и по формуле (5) рассчитать коэффициент подогрева для рассматриваемого диапазона режимных параметров.

В инженерной методике расчета традиционных поршневых ступеней сжатия формула для расчета коэффициента подогрева имеет следующий вид [6]:

$$\lambda_T = 1 - B(\epsilon_u - 1), \quad (6)$$

где ϵ_u — отношение величины давления в конце процесса сжатия к величине давления в начале процесса сжатия; B — эмпирический коэффициент, величина которого при расчете быстроходных ступеней приблизительно равна 0,01 [6]. По результатам обработки экспериментальных данных, представленных в табл. 2, применительно к длинноходовым

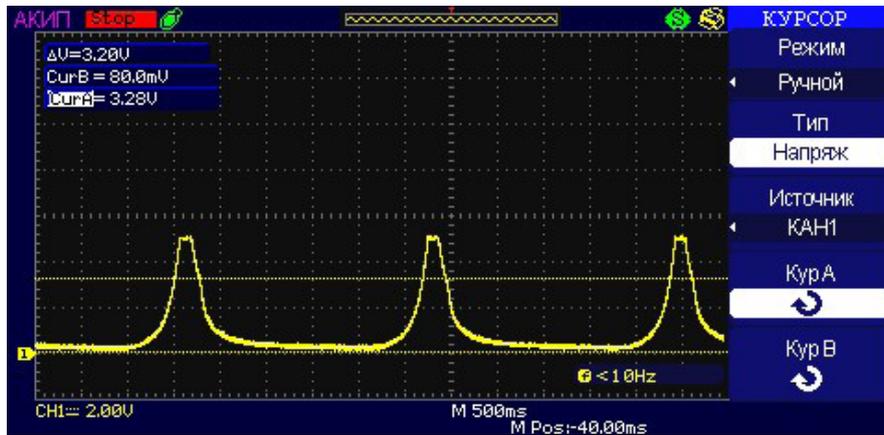


Рис. 9. Экспериментальная температурная диаграмма при давлении нагнетания 0,8 МПа, время цикла 3 с

Fig. 9. Experimental temperature diagram at 0,8 MPa discharge pressure, cycle time 3 s

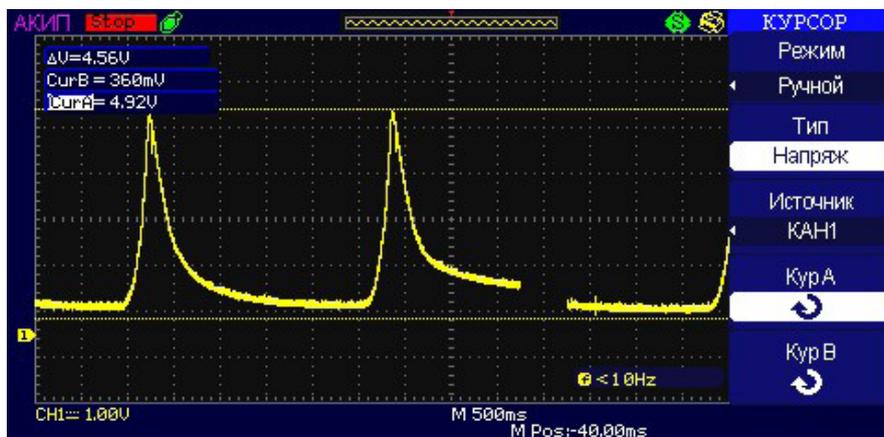


Рис. 10. Экспериментальная температурная диаграмма при давлении нагнетания 1,0 МПа, время цикла 3 с

Fig. 10. Experimental temperature diagram at 1,0 MPa discharge pressure, cycle time 3 s

Таблица 2. Экспериментальное определение коэффициента подогрева
Table 2. Experimental determination of the heating coefficient

№ эксп.	$P_{н}$, МПа	Время цикла, с	$T_{вс}$	$T_{всп}$	λ_T
1	0,5	4	292	294,5	0,996
2	0,8	2	292	300	0,975
3	1	3	292	307,5	0,953
4	2	4	292	321	0,91
5	3	2	292	329	0,89

тихоходным ступеням предварительно рекомендуется принимать $B = 0,001$.

В отличие от объемного коэффициента, коэффициента дросселирования и коэффициента подогрева, коэффициент плотности невозможно определить по экспериментальным индикаторным и температурным диаграммам. Одним из путей решения данной задачи является определение коэффициента плотности по известным величинам коэффициента подачи [6] и четырех его составляющих:

$$\lambda_{пл} = \frac{\lambda}{\lambda_o \cdot \lambda_{оп} \cdot \lambda_T \cdot \lambda_{вл}} \quad (7)$$

В этом случае суммарный коэффициент подачи (стоящий в числителе) может быть определен

как отношение величины измеренной действительной производительности к величине теоретической производительности, рассчитанной по известным основным размерам и параметрам ступени [6]. В знаменателе три коэффициента определены нами выше, а коэффициент влажности не зависит от конструктивных особенностей компрессорной ступени и определяется во всех случаях по известным термодинамическим зависимостям [6].

Некоторые результаты обработки экспериментальных данных, полученных для рассматриваемого диапазона конструктивных и режимных параметров метановой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени, представлены в табл. 3.

Анализ этих результатов показал, что для оценки потерь производительности, учитывающих влияния

Таблица 3. Определение коэффициента плотности при времени цикла $\tau=2$
Table 3. Determination of the density coefficient at cycle time $\tau=2$

	$\varepsilon=3$	$\varepsilon=5$	$\varepsilon=10$	$\varepsilon=30$
λ_o	0,99	0,97	0,95	0,88
λ_{gp}	0,99	0,99	0,98	0,95
λ_T	0,98	0,95	0,94	0,92
λ_{BA}	0,99	0,99	0,99	0,99
λ	0,97	0,9	0,86	0,7
$\lambda_{пл} = \lambda / (\lambda_o \lambda_{gp} \lambda_T \lambda_{BA})$	0,99	0,99	0,98	0,9

перетечек метана через зазоры в рабочей камере коэффициент плотности удобно представить в виде следующего выражения:

$$\lambda_{пл} = 1 - x \cdot \varepsilon, \quad (8)$$

где x — эмпирический коэффициент (для рассмотренного диапазона конструктивных и режимных параметров $x=0,003$); ε — отношение величины давления нагнетания к величине давления всасывания.

Выводы

Анализ и обработка результатов проведенных экспериментальных исследований позволили разработать методику расчета действительной производительности тихоходных длинноходовых метановых компрессорных ступеней сжатия, основанную на принципах схематизации рабочих процессов и разделения потерь, а также адаптировать существующую модель расчета рабочих параметров поршневой тихоходной ступени для сжатия метана.

Список источников

1. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. Москва: Агропромиздат, 1985. 208 с.
2. Курьев Е. С., Герасимов Н. А. Холодильные установки. Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отд., 1980. 622 с.
3. Бабакин Б. С. [и др.]. Хладагенты и их воздействие на окружающую среду // Молочная промышленность. 2016. № 6. С. 12–14.
4. Морев А. И., Ефанов В. И., Бекетов Б. А. [и др.]. Переход автотранспорта на природный газ: нормативно-справочное пособие. Москва: ИПЦ газовой промышленности, 1995. 97 с.
5. Асадов О. С., Алиев В. И. Особенности углеводородных газов и их безопасного использования // Естественные и технические науки. 2010. № 6 (50). С. 659–664.
6. Балабуха А. В., Мещук А. А., Дербичев В. С. [и др.]. Оптимизация хранения и транспортировки сжиженного природного газа на транспортном судне // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 4. URL: <https://esj.today/PDF/12SAVN419.pdf> (дата обращения: 12.04.2022).
7. Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчет. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: КолосС, 2006. 456 с. ISBN 5-9532-0428-0.
8. Фотин Б. С. [и др.]. Поршневые компрессоры. Ленинград: Машиностроение, 1987. 372 с.
9. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Гошля Р. Ю. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бесшумных 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.

Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18.

10. 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. 2016. Vol. 152. P. 297–302.

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 // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. P. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1.

12. Юша В. Л., Бусаров С. С., Недовенчаный А. В. Экспериментальная оценка эффективности рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых компрессорных ступеней при сжатии различных газов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 8. С. 27–29.

13. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Буханец Д. И., Щербань К. В. Верификация методики расчёта рабочих процессов бесшумных 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.

14. Сорокин Б. И., Соколов А. Н. Уплотнительные устройства горных машин и комплексов. Москва: Недра, 1969. 128 с.

15. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Титов Д. С. Методика моделирования рабочих процессов тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019660287 от 02.09.2019.

16. 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.

17. 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.

18. Юша В. Л., Бусаров С. С. Экспериментальная оценка индикаторного коэффициента подачи поршневой длинноходовой компрессорной ступени // Компрессорная техника и пневматика. 2020. № 3. С. 39–41.

19. Юша В. Л., Бусаров С. С. Определение показателей политропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22.

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

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

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

SPIN-код: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Адрес для переписки: habr86@mail.ru

НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Адрес для переписки: lonewolf_rus88@mail.ru

КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 3985-1096

AuthorID (SCOPUS): 57220077521

КАПЕЛЮХОВСКАЯ Александра Александровна, старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2410-8153

AuthorID (РИНЦ): 684484

Адрес для переписки: shipunovaa@mail.ru

ЗАУШИЦЫН Евгений Владимирович, магистрант гр. Хм-201 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

ГАГЛОВА Анжелика Ефремовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1612-8089,

AuthorID (РИНЦ): 719356

ГРОМОВ Антон Юрьевич, заместитель генерального директора по гражданской продукции АО НТК «Криогенная техника», г. Омск.

Адрес для переписки: azot111@bk.ru

Для цитирования

Бусаров С. С., Бусаров И. С., Недовенчаный А. В., Кобыльский Р. Э., Капелюховская А. А., Заушицын Е. В., Гаглоева А. Е., Громов А. Ю. Создание методики расчёта метановых малорасходных тихоходных компрессорных ступеней на основе обработки данных экспериментального исследования // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 40–48. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-40-48.

Статья поступила в редакцию 20.06.2022 г.

© С. С. Бусаров, И. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Р. Э. Кобыльский, А. А. Капелюховская, Е. В. Заушицын, А. Е. Гаглоева, А. Ю. Громов

CREATION METHODOLOGY FOR CALCULATING METHANE LOW-FLOW LOW-SPEED COMPRESSOR STAGES BASED ON DATA PROCESSING OF EXPERIMENTAL STUDY

S. S. Busarov¹, I. S. Busarov¹, A. V. Nedovenchany¹, R. E. Kobylskiy¹,
A. A. Kapelyukhovskaya¹, E. V. Zaushitsyn¹, A. E. Gagloyeva¹, A. Yu. Gromov²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²JSC Scientific and Technical Complex «Cryogenic Technique»,
Russia, Omsk, 22 Parts'ezda str., bld. 97/1, 644105

This article presents the results of a set of works carried out to adapt the existing mathematical model for calculating the working processes of low-speed compressor stages for methane compression and to create an engineering methodology for calculating the performance of the stage based on the experimental data obtained.

Keywords: long-stroke reciprocating compressor, operating processes, measurement of instantaneous temperature and gas pressure, experimental studies of reciprocating compressors, methane.

References

1. Bogdanov S. N., Ivanov O. P., Kupriyanova A. V. Kholodil'naya tekhnika. Svoystva veshchestv: Spravochnik [Refrigeration technology. Item Properties: Handbook]. Moscow, 1985. 208 p. (In Russ.).
2. Kurylev E. S., Gerasimov N. A. Kholodil'nyye ustanovki [Refrigeration units]. Leningrad, 1980. 622 p. (In Russ.).
3. Babakin B. S. [et al.]. Khladagenty i ikh vozdeystviye na okruzhayushchuyu sredu [Cooling agents and their effects on the environment] // Molochnaya promyshlennost'. Dairy Industry. 2016. No. 6. P. 12–14. (In Russ.).
4. Morev A. I., Efanov V. I., Beketov B. A. [et al.]. Perekhod avtotransporta na prirodnyy gaz: normativno-spravochnoye posobiye [Transition of vehicles to natural gas: regulatory and reference manual]. Moscow, 1995. 97 p. (In Russ.).
5. Asadov O. S., Aliyev V. I. Osobennosti uglevodorodnykh gazov i ikh bezopasnogo ispol'zovaniya [Features of hydrocarbon gases and their safe use] // Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. Natural and Technical Sciences. 2010. No. 6 (50). P. 659–664. (In Russ.).
6. Balabukha A. V., Meshchuk A. A., Derbichev V. S. [et al.]. Optimizatsiya khraneniya i transportirovki szhizhennogo prirodnogo gaza na transportnom sudne [Optimization of storage and transportation of liquefied natural gas on a transport vessel] // Vestnik Evraziyskoy nauki. The Eurasian Scientific Journal. 2019. Vol. 11, no. 4. URL: <https://esj.today/PDF/12SAVN419.pdf> (accessed: 12.04.2022). (In Russ.).
7. Platinin P. I. Porshnevyye kompressory. V 2 t. T. 1. Teoriya i raschet [Piston compressors. In 2 vols. Vol. 1. Theory and calculation]. 3rd ed. Moscow, 2006. 456 p. ISBN 5-9532-0428-0. (In Russ.).
8. Fotin B. S. [et al.]. Porshnevyye kompressory [Piston compressors]. Leningrad, 1987. 372 p. (In Russ.).
9. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Goshlya R. Yu. Eksperimental'noye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya [Experimental study of working processes of low-speed longstroke lubrication free piston compressor stages at high discharge pressure to suction pressures] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 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. (In Russ.).
10. 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. 2016. Vol. 152. P. 297–302. (In Engl.).
11. Nedovenchany 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 // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. P. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1. (In Engl.).
12. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchany A. V. Eksperimental'naya otsenka effektivnosti rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri szhatii razlichnykh gazov [Experimental Evaluation of the Efficiency of Working Processes of Low-Speed Long-Stroke Reciprocating Compressor Stages in the Compression of Various Gases] // Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye. Chemical and Oil and Gas Engineering. 2018. No. 8. P. 27–29. (In Russ.).
13. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Bukhanets D. I., Scherban' K. V. Verifikatsiya metodiki rascheta rabochikh protsessov bessmazochnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevnykh stupeney vysokogo davleniya [Verification of procedure for calculating working processes of lubrication free low-speed long-stroke piston highpressure stages] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 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. (In Russ.).
14. Sorokin B. I., Sokolov A. N. Uplotnitel'nyye ustroystva gornyykh mashin i kompleksov [Sealing devices of mining machines and complexes]. Moscow: Nedra Publ., 1969. 128 p. (In Russ.).
15. Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Titov D. S. Metodika modelirovaniya rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney [Methodology for modeling the working processes of low-speed long-stroke compressor stages] // Reyestr programm dlya EVM. Register of Computer Programs. No. 2019660287, 02.09.2019.

16. 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 porshnevoy 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.).

17. 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.).

18. Yusha V. L., Busarov S. S. Eksperimental'naya otsenka indikatornogo koeffitsiyenta podachi porshnevoy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni [Experimental evaluation of the indicator feed rate of a long-stroke pistons compressors stage] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors and Pneumatics*. 2020. No. 3. P. 39–41. (In Russ.).

19. Yusha V. L., Busarov S. S. Opredeleniye pokazateley politropy skhematizirovannykh rabochikh protsessov vozdushnykh porshnevykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney [Determination of polytropic indicators of schematized working processes of air piston slowmoving long-stroke compressor stages] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22. (In Russ.).

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

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Correspondence address: bssi1980@mail.ru

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

AuthorID (RSCI): 966534

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Correspondence address: habr86@mail.ru

NEDOVENCHANY Aleksey Vasilievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Refrigeration and

Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Correspondence address: lonewolf_rus88@mail.ru

KOBYLSKIY Roman Eduardovich, Assistant of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 3985-1096

AuthorID (SCOPUS): 57220077521

KAPELYUKHOVSKAYA Aleksandra Aleksandrovna, Senior Lecturer of Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2410-8153

AuthorID (RSCI): 684484

Correspondence address: shipunovaa@mail.ru

ZAUSHITSYN Evgeniy Vladimirovich, Undergraduate gr. Xm-201 of Elite Education and Master's Degree Program Faculty, OmSTU, Omsk.

GAGLOEVA Anzhelika Efremovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1612-8089,

AuthorID (RSCI): 719356

GROMOV Anton Yuryevich, Deputy General Director for Civilian Products of Scientific and Technical Complex «Cryogenic technique» JSC, Omsk.

Correspondence address: azot111@bk.ru

For citations

Busarov S. S., Busarov I. S., Nedovenchany A. V., Kobylskiy R. E., Kapelyukhovskaya A. A., Zaushitsyn E. V., Gagloyeva A. E., Gromov A. Yu. Creation methodology for calculating methane low-flow low-speed compressor stages based on data processing of experimental study // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 40–48. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-40-48.

Received June 20, 2022.

© S. S. Busarov, I. S. Busarov, A. V. Nedovenchany,

R. E. Kobylskiy, A. A. Kapelyukhovskaya, E. V. Zaushitsyn,

A. E. Gagloyeva, A. Yu. Gromov