

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК УЧЁТА РЕАЛЬНОСТИ ГАЗА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

О. А. Соловьёва, И. С. Шариков, Н. И. Садовский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

При проектировании компрессоров необходимо производить учёт реальности рабочего тела, так как при расчёте компрессора по моделям идеального газа возникают сильные отклонения рабочих параметров от рассчитанных, что может привести к невыполнению технического задания, а также к образованию нестационарных процессов. Правильный выбор методики учёта реальности газа позволяет максимально приблизить расчётные данные к экспериментальным. Таким образом, выбор наиболее точной методики учёта реальности газа позволяет предсказать экспериментальные характеристики проектируемого компрессора ещё до проведения физических испытаний. Существует множество методик, позволяющих учесть реальность газа, а именно рассчитать по эмпирическим формулам фактор сжимаемости. В данной работе приведено сравнение четырех методик и выполнен расчет центробежного компрессора с учетом полученных по данным методикам значений фактора сжимаемости. Приведено сравнение рассчитанных газодинамических характеристик с экспериментальными данными и выявлены расхождения при разных оборотах ротора.

Ключевые слова: идеальный газ, фактор сжимаемости, метан, показатель адиабаты, природный газ, реальность газа, центробежный компрессор.

Введение

Идеальный газ — это газ, молекулы которого не взаимодействуют между собой, а также в модели идеального газа молекулы не занимают объёма. Уравнение Менделеева–Клапейрона является уравнением состояния идеального газа и имеет следующий вид (1)

$$P/\rho = R \cdot T. \quad (1)$$

Свойства реального газа существенно зависят от взаимодействия молекул. При нормальных условиях, когда средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул намного меньше их средней кинетической энергии, свойства реальных газов несильно отличаются от свойств идеального газа, и в таком случае к реальным газам можно применять законы, установленные для идеального газа. Свойства реального газа начинают сильнее отличаться от свойств идеального газа чем выше его давление и чем ниже его температура, когда начинают проявляться квантовые эффекты. Отклонение свойств реального газа от идеального может быть учтено, если в уравнение Менделеева–Клапейрона ввести фактор сжимаемости реального газа z .

Существует множество методик, учитывающих влияние реальности газа. Представляется интересным сравнение некоторых методик и выбор наиболее подходящей для расчетов газодинамических характеристик центробежного компрессора (ЦК).

Постановка задачи

Молекулы в реальном газе занимают определённый объём и взаимодействуют между собой. Отклонение свойств реального газа от идеального становится более существенным при увеличении плотности газа. Отклонение может быть учтено, если в уравнение Менделеева–Клапейрона ввести дополнительный коэффициент z — фактор сжимаемости реального газа. Состояние такого газа может быть с большой точностью описано обобщённым уравнением Менделеева–Клапейрона (2)

$$P/\rho = z \cdot R \cdot T. \quad (2)$$

В связи с тем, что z является нелинейной зависимостью от P и T , становится актуальным вопрос о выборе наиболее оптимального метода расчета фактора сжимаемости. На основании анализа литературных данных были выделены для рассмотрения следующие методы [1–10]. Чтобы оценить влияние методик расчета реальности газа на газодинамические характеристики центробежного компрессора, был выбран реально существующий объект.

Объект исследования

Объектом исследования выбран центробежный одновальный двухступенчатый компрессор природного газа на конечное абсолютное давление 9,91 МПа, с отношением давлений 1,5 — ЦБК405-

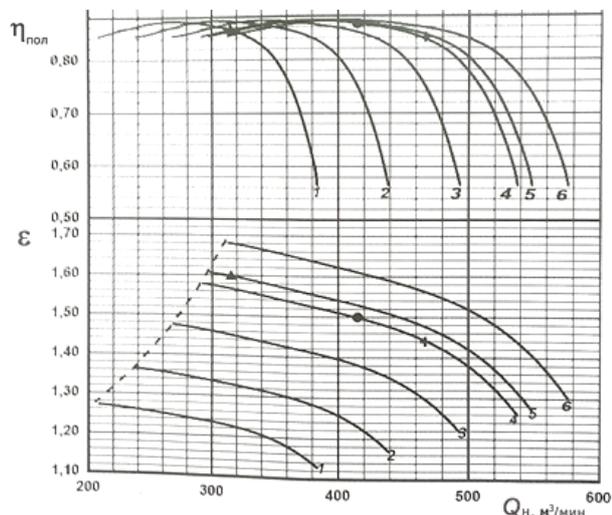


Рис. 1. Газодинамические характеристики компрессора ЦБК405-1,44/101-5000/25СМП

Обозначения: Q_n — производительность объёмная, отнесённая к начальным условиям; ε — отношение давлений; $\eta_{пол}$ — политропный КПД; ● — номинальный режим; + — первый дополнительный режим; ▲ — второй дополнительный режим; - - - — граница помпажа. Начальные условия: давление на нагнетании $P_k = 9,91$ МПа; температура начальная $T_n = 288,15$ К; газовая постоянная сжимаемого природного газа $R = 509,0$ Дж/(кг·К); показатель адиабаты $k = 1,31$; частота вращения ротора n , об/мин: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250

Fig. 1. Gasdynamic characteristics of the CBK405-1.44/101-5000/25СМП compressor

Designations: Q_n — inlet flow rate related to the initial conditions; ε — pressure ratio; $\eta_{пол}$ — polytropic efficiency; ● — nominal mode; + — first additional mode; ▲ — second additional mode; - - - — surge limit. Initial conditions: discharge pressure $P_k = 9,91$ МПа; initial temperature $T_n = 288,15$ К; gas constant of compressible natural gas $R = 509,0$ J/(kg·K); adiabatic index $k = 1,31$; rotor speed n , rpm: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250

Таблица 1. Основные параметры компрессора
Table 1. Basic parameters of the compressor

Наименование параметра	—
Производительность объёмная, отнесённая к начальным условиям, м³/мин	410,0
Давление газа начальное, абсолютное при входе во всасывающий патрубок, МПа	6,607
Давление газа конечное, абсолютное на выходе из нагнетательного патрубка, МПа	9,91
Отношение давлений	1,50
Температура газа при входе, К (°С)	288,15 (15)
Плотность газа, отнесённая к 20 °С и 0,1013 МПа, кг/м³	0,6807
Политропный КПД, не менее	0,86
Мощность, потребляемая на муфте турбины, МВт, не более	22,6
Частота вращения ротора, об/мин	4900

1,44/101-5000/25СМП мощностью 25 МВт, разработанный для ГПА и предназначенный для работы в его составе для сжатия газа на линейной компрессорной станции.

Графики зависимости КПД и отношения давлений от объёмного расхода при различных частотах

Таблица 2. Состав газа
Table 2. Gas composition

Компонент газа	Объёмная доля, %
Метан (CH ₄)	98,1848
Этан (C ₂ H ₆)	0,6848
Пропан (C ₃ H ₈)	0,2057
Изобутан (C ₄ H ₁₀ -i)	0,0353
Норм. бутан (C ₄ H ₁₀)	0,033
Изопентан (C ₅ H ₁₂ -i)	0,0046
Азот (N ₂)	0,8176
Углекислый газ (CO ₂)	0,0339

вращения ротора компрессора, полученные экспериментально, представлены на рис. 1.

Основные параметры компрессора на номинальном режиме представлены в табл. 1.

Состав природного газа, сжимаемого в компрессоре, представлен в табл. 2.

Теория

Существует множество методик учёта реальности газа. В данной работе представлено применение четырёх из них для расчета газодинамических характеристик центробежного компрессора, а именно определение свойств газов по закону соответственных состояний [7]; методика, разработанная ВНИИ-ГАЗ по уравнению Бенедикта—Вэбба—Рабина [8]; методика, использующая уравнение состояния смеси газов Загорученко В. А. [9]; методика, установленная по СТО Газпром 2-3.5-113-2007 [10].

Определение свойств газов по закону соответственных состояний [7]

Закон соответственных состояний — приведённые свойства (3), представляющие собой отношения свойства в заданной области термодинамической поверхности к соответствующему свойству в критической точке, для всех газов являются одинаковыми.

$$p_{пр} = \frac{p}{p_{крсм}}, \text{ атм}; T_{пр} = \frac{T}{T_{крсм}}, \text{ К.} \quad (3)$$

Учет реальности газа по данной методике представляет процесс с применением большого количества графических зависимостей, таблиц и ограниченного числа компонентов газа, что в значительной степени усложняет процесс учета сжимаемости природного газа.

Методика, разработанная во ВНИИГАЗ по уравнению Бенедикта—Вэбба—Рабина [8]

В данной методике в качестве базового уравнения состояния применено упрощённое уравнение состояния Бенедикта—Вэбба—Рабина (БВР), представленное в приведённой форме (4), и на его основе определены формулы для расчёта других функций сжимаемости.

$$Z = 1 + \left(\frac{a_1}{\tau} - \frac{a_2}{\tau^2} - \frac{a_3}{\tau^4} \right) \cdot \frac{\pi}{Z} + \left(\frac{a_4}{\tau^2} - \frac{a_5}{\tau^3} - \frac{a_6}{\tau^5} \right) \cdot \frac{\pi^2}{Z^2}, \quad (4)$$

где τ и π — соответственно приведённая температура и приведённое давление, которые определяются по формулам 3, a_i — коэффициенты.

Рекомендуемый диапазон применения данной методики для расчёта параметров, учитывающих реальность газа: объёмная доля метана в смеси более 85 %; $260 \text{ K} < T < 400 \text{ K}$; $P < 15 \text{ МПа}$.

При выполнении данных условий погрешность расчёта напора, КПД и мощности, связанная с неточностью термодинамических данных, не превышает 0,5 %.

Методика, использующая уравнение состояния смеси газов В. А. Загорученко [9]

Проблемой многих из существующих методик учёта реальности газа является отсутствие сведений о применении их при давлениях порядка 25 МПа – 50 МПа и выше. Для составляющих углеводородных газов и их смесей В. А. Загорученко создано интерполяционное уравнение состояния (5), справедливое при давлениях до 70 МПа для 20 реальных газов и их смесей, для которых имеются полученные автором экспериментальные коэффициенты, приведённые в [9]:

$$\left\{ \begin{aligned} pV &= R[\alpha(\rho) + \beta(\rho)T \cdot 10^{-2} + \gamma(\rho)10^4 T^{-2}]; \\ \alpha(\rho) &= \sum_1^6 a_i \rho^i 10^{-i}; \\ \beta(\rho) &= 100 + \sum_1^6 b_i \rho^i 10^{-i}; \\ \gamma(\rho) &= \sum_1^6 c_i \rho^i 10^{-i}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где p — давление, Па; V — удельный объём $\text{м}^3/\text{моль}$; ρ — плотность, $\text{моль}/\text{дм}^3$; T — температура, К; R — газовая постоянная [$R = 8,3143 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$].

Элементарные функции уравнения состояния $\alpha(\rho)$, $\beta(\rho)$ и $\gamma(\rho)$ зависят только от плотности и представлены аналитически в виде полиномов по степени ρ .

Эмпирические коэффициенты компонентов смеси a_i , b_i и c_i представлены в [9].

В работе [9] указаны средние и наибольшие расхождения с наиболее надёжными опытными данными. Уравнения справедливы при всех охваченных

опытами температурах от тройных точек, а по азоту от 125 К, в интервалах плотностей, также указанных в [9]. Уравнения с достаточной точностью удовлетворяют параметрам в критической точке каждого описанного вещества.

Программный код данной методики, написанный на языке программирования Fortran, есть в открытом доступе и был использован для проведения дальнейших расчётов.

Методика, установленная по СТО Газпром 2-3.5-113-2007 [10]

В данной методике используется большое количество эмпирических коэффициентов.

Фактор сжимаемости газа по входным параметрам $z_{\text{ин}}$ вычисляется по формуле (6):

$$z_{\text{ин}} = 1 - [(10,2P_{\text{ин}} - 6)(0,345 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta_B - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015][1,3 - 0,0144(T_{\text{ин}} - 283,2)], \quad (6)$$

где $T_{\text{ин}}$ — температура на входе в компрессор, К; $P_{\text{ин}}$ — давление на входе в компрессор, МПа; Δ_B — относительная плотность газа по воздуху.

Относительная плотность газа по воздуху Δ_B вычисляется по формуле (7):

$$\Delta_B = \frac{\rho_0}{1,2044}; \quad (7)$$

где ρ_0 — плотность газа при 20 °С и 0,1013 МПа, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Показатель псевдоэнтропии (средний по процессу сжатия) вычисляется по формуле (8):

$$\frac{k}{k-1} = 4,16 + 0,0041(t_{cp} - 10) + 3,93(\Delta_B - 0,55) + 5,0(m_T - 0,3), \quad (8)$$

где m_T — температурный показатель политропы; t_{cp} — среднее значение температуры.

Таким образом, пользуясь данной методикой, зная начальные и конечные параметры газа и состав сжимаемого газа, можно определить параметры, учитывающие его реальность, а именно фактор сжимаемости z и показатель псевдоэнтропии k .

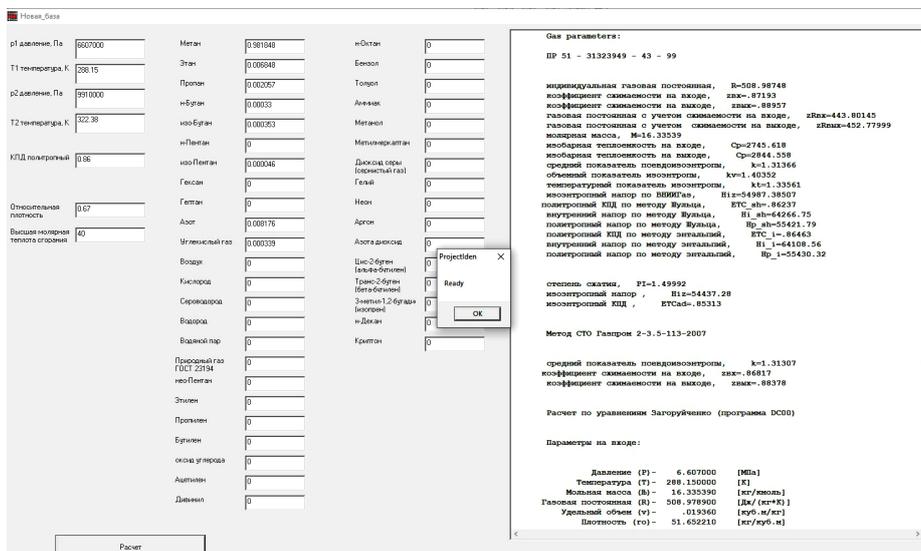


Рис. 2. Интерфейс программы для расчёта k и zR
Fig. 2. Program interface for calculating k and zR

Таблица 3. Результат расчёта k и zR
Table 3. The result of calculating k and zR

Наименование методики	$z_{вх}$	$R, \Delta\text{ж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$zR, \Delta\text{ж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$k_{ср}$	$k_{вх}$
Уравнение БВР	0,8719	508,987	443,801	1,3137	—
СТО Газпром 2-3.5-113-2007	0,8682	—	441,888	1,3131	—
Уравнение В. А. Загорученко	0,8722	508,979	443,912	1,4157	1,3897

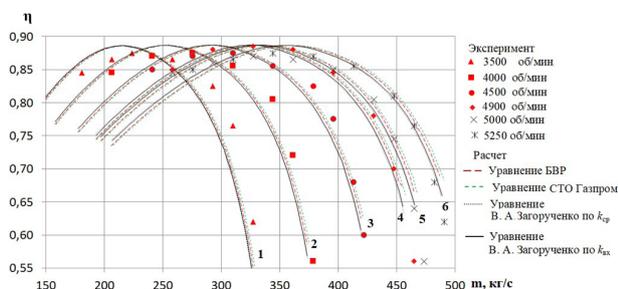


Рис. 3. Семейство характеристик политропного КПД
Частота вращения ротора n , об/мин: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250
Fig. 3. Family of polytropic efficiency characteristics.
Rotor speed n , rpm: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250

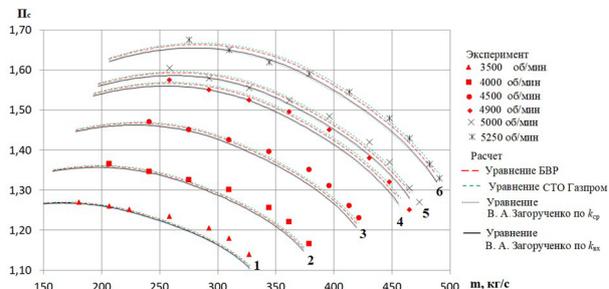


Рис. 4. Зависимость отношения давлений от массового расхода. Частота вращения ротора n , об/мин: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250
Fig. 4. Dependence of the pressure ratio on the mass flow rate.
Rotor speed n , rpm: 1 — 3500, 2 — 4000, 3 — 4500, 4 — 4900, 5 — 5000, 6 — 5250

Таблица 4. Расчётные режимы работы компрессора \bar{m} , кг/с
Table 4. Design regimes of the compressor \bar{m} , kg/s

Наименование методики	n , об/мин					
	3500	4000	4500	4900	5000	5250
Уравнение БВР [8]	251,60	287,43	322,76	350,87	357,88	374,33
СТО Газпром 2-3.5-113-2007 [10]	252,69	288,67	324,14	351,88	359,42	377,54
Уравнение В. А. Загорученко по $k_{ср}$ [9]	251,91	287,45	322,81	350,41	357,97	375,47
Уравнение В. А. Загорученко по $k_{вх}$ [9]	251,90	287,43	322,78	350,38	357,93	375,97

Результаты расчетов

Для расчёта показателя адиабаты k и произведения zR для смеси газов была написана компьютерная программа на языке программирования Visual Basic. В программу была включена база данных с основными сведениями, необходимыми для расчетов, для сорока газов. Интерфейс программы показан на рис. 2.

Входными данными для расчёта в программе являются объёмные доли компонентов смеси, входные и выходные давления и температуры смеси, политропный КПД.

Как результат расчёта получаются значения фактора сжимаемости z по входным параметрам, а также средние значения показателя адиабаты k . По методике, использующей уравнение В. А. Загорученко, также получается значение показателя адиабаты k в начале процесса сжатия. Результаты расчёта параметров, учитывающих реальность газа компрессора ЦБК405-1,44/101-5000/25СМП, представлен в табл. 3 (при давлении на входе 6,607 МПа, давлении на выходе 9,91 МПа, температуре на входе 288,15 К).

Расчёт характеристик производился в программе Метода универсального моделирования, разра-

ботанной в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого [11–20]. Комплекс компьютерных программ для расчета характеристик и оптимального проектирования центробежных ступеней и компрессоров позволяет выполнять проекты высокоэффективных машин без экспериментальной проверки. Программы Метода универсального моделирования постоянно развиваются и совершенствуются.

Газодинамические характеристики были посчитаны для шести различных частот вращения ротора: 3500 об/мин, 4000 об/мин, 4500 об/мин, 4900 об/мин, 5000 об/мин и 5250 об/мин; а также при различных значениях показателя адиабаты k и произведения zR , полученных по различным методикам учёта реальности газа.

Характеристики сведены на один график, тем самым получено семейство характеристик КПД и отношения давлений при изменении частоты вращения ротора (рис. 3, 4).

Также по написанной программе были посчитаны расчётные режимы работы компрессора при использовании различных методик учёта реальности газа и при различных частотах вращения ротора.

Результат расчёта представлен в табл. 4.

Анализируя полученные характеристики, можно сделать вывод, что наиболее близко к экспериментальным данным лежат характеристики, рассчитанные с учётом реальности газа по методике СТО Газпром 2-3.5-113-2007 и по методике, использующей уравнение БВР.

При уменьшении частоты вращения ротора компрессора увеличивается расхождение расчётных данных от экспериментальных. Так, при частоте вращения 5200 об/мин максимальное отклонение составляет около 1 %, при минимальной частоте 3500 об/мин отклонение — до 6,5 %.

Чем больше частота вращения ротора, тем сильнее отличаются результаты расчёта с учётом реальности газа, посчитанные по разным методикам. Это говорит о том, что при увеличении частоты вращения параметры, учитывающие реальность газа, а именно показатель адиабаты k и произведение zR , начинают оказывать более сильное влияние на характеристики компрессора.

Выводы и заключение

В данной работе исследовано влияние метода учёта реальности газа на характеристики центробежного компрессора ЦБК405-1,44/101-5000/25СМП.

Для проведения данного исследования подобраны и описаны методики, которые позволяют рассчитывать параметры, учитывающие реальность газа.

Выбранные методики сведены в единую компьютерную программу, которая использовалась для расчёта показателя адиабаты k и произведения zR .

Полученные параметры k и zR использованы в программе Метода универсального моделирования для расчёта характеристик политропного КПД и отношения давлений компрессора.

Характеристики компрессора рассчитаны при различных значениях частоты вращения ротора, что позволило построить семейство характеристик и сравнить с экспериментальными данными.

Наиболее близкие к экспериментальным данным результаты давали методика, установленная по СТО Газпром 2-3.5-113-2007, погрешность 1,08 % на расчётных режимах, и методика, использующая уравнение БВР, погрешность 1,07 % на расчётных режимах. При уменьшении частоты вращения ротора компрессора увеличивается расхождение расчётных данных от экспериментальных. Так, при частоте вращения 5200 об/мин максимальное отклонение составляет около 1 %, при минимальной частоте 3500 об/мин отклонение — до 6,5%. Чем выше частота вращения, тем большее влияние оказывают k и zR на характеристики компрессора.

Правильный выбор методики учёта реальности газа позволяет максимально приблизить расчётные данные к экспериментальным. Таким образом, выбор наиболее точной методики расчёта параметров учёта реальности газа позволяет предсказать экспериментальные характеристики проектируемого компрессора ещё до проведения физических испытаний.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00200, <https://rscf.ru/project/23-29-00200/>.

1. СТО Газпром 11-2005. Методические указания по расчёту валовых выбросов углеводородов (суммарно) в атмосферу в ОАО «Газпром». Введ. 25–10–2005. Москва: ООО «Центр безопасности труда», 2007. 42 с.

2. РД 153-39.0-112-2001. Методика определения норм расхода и нормативной потребности в природном газе на собственные технологические нужды магистрального транспортного газа. Москва: ОАО «Газпром»: ООО ВНИИГАЗ, 2001. 53 с.

3. ОНТП 51-1-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы. Москва: ВНИИЭГазпром, 1986. 95 с.

4. СТО Газпром 2-3.5-051-06. Нормы технического проектирования магистральных трубопроводов. Введ. 03–07–2006. Москва: ООО «Центр безопасности труда», 2006. 199 с.

5. Сарданашвили С. А. Расчётные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). Москва: Нефть и газ, 2005. 577 с. ISBN 5-7246-0356-X.

6. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. Введ. 01–07–1997. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2000. 51 с.

7. Стрижак Л. Я. Исследование влияния формы межлопаточных каналов центробежного компрессорного колеса на его характеристики: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград: [б. и.], 1968. 235 с.

8. ПР 51-31323949-43-99. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Разраб. В. А. Щуровский, Ю. Н. Сеницын, В. И. Корнеев [и др.]. URL: https://nd-gsi.ru/ntd/pr/pr_51-31323949-43-99.pdf (дата обращения: 11.05.2024).

9. Теплотехнические расчеты процессов транспорта и регазификации природных газов: справ. пособие / Подгот. В. А. Загорученко, Р. Н. Бикчентай, А. К. Трошин [и др.]. Москва: Недра, 1980. 319 с.

10. СТО Газпром 2-3.5-113-2007. Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем / ОАО «Газпром». Москва: ОАО Газпром, 2007 (Москва: Изд. дом Полиграфия). 54 с.

11. Галеркин Ю. Б., Рекстин А. Ф., Дроздов А. А., Солдатова К. В., Соловьёва О. А., Попова Е. Ю. Проектирование центробежных компрессоров на основе метода универсального моделирования // Вести газовой науки. 2020. № 2 (44) С. 92–109. EDN: PLNRUM.

12. Galerkin Yu., Rekstin A., Soldatova K., Drozdov A., Solovyeva O., Semenovskiy V., Marenina L. The current state of the engineering method for the optimal gas-dynamic design and calculation of centrifugal compressor // Energies 2020. Vol. 13 (21). 5651. DOI: 10.3390/en13215651. EDN: JWXVPO.

13. Дроздов А. А., Галеркин Ю. Б., Соловьёва О. А., Солдатова К. В., Уцеховский А. А. Математическая модель Метода универсального моделирования 9-й версии: особенности и результаты идентификации // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4. С. 28–40. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-28-40. EDN: HBKFME.

14. Solovyeva O., Galerkin Yu., Rekstin A., Soldatova K., Yusha V., Kabalyk K. Centrifugal compressor stage. Vaneless diffuser preliminary design by universal modeling method // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2020. Vol. 10, Issue 3. P. 14879–14894. DOI: 10.24247/ijmperdjun20201417.

15. Соловьёва О. А., Солдатова К. В., Галеркин Ю. Б., Рекстин А. Ф. Первичное проектирование безлопаточных диффузоров центробежных компрессорных ступеней Методом универсального моделирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 3 (732). С. 39–52. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-3-39-52. EDN: SYIIG.

16. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solovyeva O. A., Semenovskiy V. B. The Application Practice of the Universal Modeling Method 9th Version for Industry // Oil and Gas Engineering – AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2412 (1). 030021. DOI: 10.1063/5.0075001.

17. Drozdov A. A., Galerkin Y. B., Solovyeva O. A., Soldatova K. V., Ucehovskiy A. A. Development and identification of a mathematical model of centrifugal compressor stages using the universal modeling method // Oil and Gas Engineering – AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. 030057. DOI: 10.1063/5.0026727.

18. Галеркин Ю. Б., Дроздов А. А., Рекстин А. Ф., Соловьёва О. А., Семеновский В. Б. Опыт практического применения Метода универсального моделирования 9-й версии // Компрессорная техника и пневматика. 2021. № 1. С. 26–36. EDN: VKJHXG.

19. Галеркин Ю. Б., Дроздов А. А., Рекстин А. Ф., Соловьёва О. А., Маренина Л. Н. Математическая модель метода универсального моделирования девятой версии для расчета и проектирования центробежных компрессоров: идентификация и верификация по экспериментальным данным // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 1 (140). С. 82–102. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-1-82-102. EDN: WDTVUY.

20. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solovyeva O. A., Marenina L. N. Identification and verification of the universal modeling method mathematical model // Oil and Gas Engineering – AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2784. 030001. DOI: 10.1063/5.0140618.

СОЛОВЬЁВА Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 4572-8002

AuthorID (РИНЦ): 703529

ORCID: 0000-0001-5746-3071

AuthorID (SCOPUS): 57220022694

ResearcherID: C-5456-2017

Адрес для переписки: Solovyeva.OA@yandex.ru

ШАРИКОВ Илья Сергеевич, магистрант Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: ilya20142001@mail.ru

САДОВСКИЙ Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетики СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2568-1299

AuthorID (РИНЦ): 120322

ORCID: 0000-0003-3494-5769

AuthorID (SCOPUS): 57221745249

ResearcherID: AAG-5818-2019

Адрес для переписки: sadovsky2k10@mail.ru

Для цитирования

Соловьёва О. А., Шариков И. С., Садовский Н. И. Сопоставление методик учёта реальности газа и их влияние на газодинамические характеристики центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 61–68. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-61-68.

Статья поступила в редакцию 27.06.2024 г.

© О. А. Соловьёва, И. С. Шариков, Н. И. Садовский

THE INFLUENCE OF REALITY GAS CALCULATION METHODS ON THE GASDYNAMIC CHARACTERISTICS OF A GAS PUMPING UNIT CENTRIFUGAL COMPRESSOR

O. A. Solovyeva, I. S. Sharikov, N. I. Sadovsky

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya str., 29, 195251

When designing compressors, it is necessary to take into account the reality of the working fluid, since when calculating the compressor using ideal gas models, strong deviations of the operating parameters from the calculated ones occur, which can lead to non-fulfillment of the technical specifications, as well as to the formation of non-stationary processes. The correct choice of the gas reality accounting methodology allows us to bring the calculated data as close as possible to the experimental ones. Thus, the choice of the most accurate method of accounting for the reality of gas makes it possible to predict the experimental characteristics of the designed compressor even before conducting physical tests. There are many methods that allow us to take into account the reality of gas, namely, to calculate the compressibility factor using empirical formulas. In this paper, a comparison of four methods is presented, and the calculation of a centrifugal compressor is performed taking into account the values of the compressibility factor obtained according to these methods. The calculated gas dynamic characteristics are compared with experimental data and discrepancies are revealed at different rotor speeds.

Keywords: ideal gas, compressibility factor, methane, adiabatic coefficient, natural gas, gas reality, centrifugal compressor.

Acknowledgments

The research is carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00200, <https://rscf.ru/project/23-29-00200/>

References

1. STO Gazprom 11-2005. Metodicheskiye ukazaniya po raschetu valovykh vybrosov uglevodorodov (summarno) v atmosferu v OAO «Gazprom» [STO Gazprom 11-2005. Guidelines for calculation of gross hydrocarbon emissions (total) into the atmosphere in OJSC «Gazprom»]. Moscow, 2007. 42 p. (In Russ.).
2. RD 153-39.0-112-2001. Metodika opredeleniya norm raskhoda i normativnoy potrebnosti v prirodnom gaze na sobstvennyye tekhnologicheskiye nuzhdy magistral'nogo transportnogo gaza [RD 153-39.0-112-2001. Methodology for determination of consumption norms and normative demand for natural gas for own technological needs of trunk transport gas]. Moscow, 2001. 53 p. (In Russ.).
3. ONTP 51-1-85. Obshchesoyuznyye normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya. Magistral'nyye truboprovody. Chast' 1. Gazoprovody [ONTP 51-1-85. All-Union norms of technological design. Trunk pipelines. Part 1. Gas pipelines]. Moscow, 1986. 95 p. (In Russ.).
4. STO Gazprom 2-3.5-051-06. Normy tekhnicheskogo proyektirovaniya magistral'nykh truboprovodov [STO Gazprom 2-3.5-051-06. Norms of technical design of trunk pipelines]. Moscow, 2006. 199 p. (In Russ.).
5. Sardanashvili S. A. Raschetnyye metody i algoritmy (truboprovodnyy transport gaza) [Calculation methods and algorithms (gas pipeline transport)]. Moscow, 2005. 577 p. ISBN 5-7246-0356-X. (In Russ.).
6. GOST 30319.2-96. Gaz prirodnyy. Metody rascheta fizicheskikh svoystv. Opredeleniye koeffitsiyenta szhimayemosti [GOST 30319.2-96. Natural gas. Methods of calculation of physical

properties. Definition of compressibility coefficient]. Moscow, 2000. 51 p. (In Russ.).

7. Strizhak L. Ya. Issledovaniye vliyaniya formy mezhlopatochnykh kanalov tsentrobrazhnogo kompressornogo koleasa na ego kharakteristiki [Study influence of the shape of interblade channels of a centrifugal compressor wheel on its characteristics characteristics]. Leningrad, 1968. 235 p. (In Russ.).

8. PR 51-31323949-43-99. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu teplotekhnicheskikh i gazodinamicheskikh raschetov pri ispytaniyakh gazoturbinykh gazoperekachivayushchikh agregatov [PR 51-31323949-43-99. Guidelines for conducting heat engineering and gas-dynamic calculations for testing gas turbine gas pumping units] / Developers: V. A. Shchurovskiy, Yu. N. Sinitsyn, V. I. Korneyev [et al.]. URL: https://nd-gsi.ru/ntd/pr/pr_51-31323949-43-99.pdf (accessed: 11.05.2024). (In Russ.).

9. Teplotekhnicheskiye raschety protsessov transporta i regazifikatsii prirodnykh gazov: sprav. posobiye [Thermal Engineering Calculations of Natural Gas Transportation and Regasification Processes: Reference Manual] / Podgot. V. A. Zagoruchenko, R. N. Bikchentay, A. K. Troshin [et al.]. Moscow, 1980. 319 p. (In Russ.).

10. STO Gazprom 2-3.5-113-2007. Metodika otsenki energoeffektivnosti gazotransportnykh ob'yektov i sistem [STO Gazprom 2-3.5-113-2007. Methodology of energy efficiency assessment of gas transmission facilities and systems]. Moscow, 2007. 54 p. (In Russ.).

11. Galerkin Yu. B., Rekstin A. F., Drozdov A. A., Soldatova K. V., Solov'yeva O. A., Popova E. Yu. Proyektirovaniye tsentrobrazhnykh kompressorov na osnove metoda universal'nogo modelirovaniya [Design of centrifugal compressors by means of a universal modelling method] // Vesti gazovoy nauki. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2020. No. 2 (44). P. 92–109. EDN: PLNRUM. (In Russ.).

12. Galerkin Yu., Rekstin A., Soldatova K., Drozdov A., Solovyeva O., Semenovskiy V., Marenina L. The current state of the engineering method for the optimal gas-dynamic design and

calculation of centrifugal compressor // *Energies* 2020. Vol. 13 (21). 5651. DOI: 10.3390/en13215651. EDN: JWVXPO. (In Engl.).

13. Drozdov A. A., Galerkin Yu. B., Solov'yeva O. A., Soldatova K. V., Utsekhovskiy A. A. Matematicheskaya model' Metoda universal'nogo modelirovaniya 9-y versii: osobennosti i rezul'taty identifikatsii [Mathematical model of the 9th version universal modeling method: features and results of identification] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 28–40. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-28-40. EDN: HBFKME. (In Russ.).

14. Solovyeva O., Galerkin Yu., Rekstin A., Soldatova K., Yusha V., Kabalyk K. Centrifugal compressor stage. Vaneless diffuser preliminary design by universal modeling method // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2020. Vol. 10, Issue 3. P. 14879–14894. DOI: 10.24247/ijmperdjun20201417. (In Engl.).

15. Solovyeva O. A., Soldatova K. V., Galerkin Yu. B., Rekstin A. F. Pervichnoye proyektirovaniye bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney Metodom universal'nogo modeler [Primary design of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages by the universal modeling method] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2021. No. 3 (732). P. 39–52. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-3-39-52. EDN: SYIIG. (In Russ.).

16. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solovyeva O. A., Semenovskiy V. B. The Application Practice of the Universal Modeling Method 9th Version for Industry // *Oil and Gas Engineering — AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2412 (1). 030021. DOI: 10.1063/5.0075001. (In Engl.).

17. Drozdov A. A., Galerkin Yu. B., Solovyeva O. A., Soldatova K. V., Uchevskiy A. A. Development and identification of a mathematical model of centrifugal compressor stages using the universal modeling method // *Oil and Gas Engineering — AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285. 030057. DOI: 10.1063/5.0026727.18. (In Engl.).

18. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solov'yeva O. A., Semenovskiy V. B. Opyt prakticheskogo primeneniya Metoda universal'nogo modelirovaniya 9-y versii [Practical experience of the Universal Modeling Method 9th version] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2021. No. 1. P. 26–36. EDN: BKJHXG. (In Russ.).

19. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solov'yeva O. A., Marenina L. N. Matematicheskaya model' metoda universal'nogo modelirovaniya devyatoy versii dlya rascheta i proyektirovaniya tsentrobezhnykh kompressorov: identifikatsiya i verifikatsiya po eksperimental'nym dannym [Mathematical Model of the Universal Modeling Method Version 9 for the Calculation

and Design of Centrifugal Compressors: Identification and Verification from Experimental Data] // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye. Herald of the Bauman Moscow State Technical University Series Mechanical Engineering*. 2022. No. 1 (140). P. 82–102. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-1-82-102. EDN: WDTVUY. (In Russ.).

20. Galerkin Yu. B., Drozdov A. A., Rekstin A. F., Solovyeva O. A., Marenina L. N. Identification and verification of the universal modeling method mathematical model // *Oil and Gas Engineering — AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2784. 030001. DOI: 10.1063/5.0140618. (In Engl.).

SOLOVYEVA Olga Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg.

SPIN-code: 4572-8002

AuthorID (RSCI): 703529

AuthorID (SCOPUS): 57220022694

ORCID: 0000-0001-5746-3071

ResearcherID: C-5456-2017

Correspondence address: Solovyeva.oa@yandex.ru

SHARIKOV Ilya Sergeevich, Undergraduate of Higher School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

Correspondence address: ilya20142001@mail.ru

SADOVSKY Nikolay Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, Institute of Power Engineering, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 2568-1299

AuthorID (RSCI): 120322

ORCID: 0000-0003-3494-5769

AuthorID (SCOPUS): 57221745249

ResearcherID: AAG-5818-2019

Correspondence address: sadovsky2k10@mail.ru

For citations

Solovyeva O. A., Sharikov I. S., Sadovsky N. I. The influence of reality gas calculation methods on the gasdynamic characteristics of a gas pumping unit centrifugal compressor // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 61–68. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-61-68.

Received June 27, 2024.

© O. A. Solovyeva, I. S. Sharikov, N. I. Sadovsky