

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING



УДК 621.515

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Оригинальная статья /Original article

**Сравнение способов моделирования газодинамических характеристик
высоконапорных центробежных компрессоров, обеспечивающих работу
промышленных установок низкотемпературной сепарации,
на примере модификации с отношением давлений до 1,9...2,1**

**М.А. Воронцов^{1,3}, В.Ю. Глазунов⁴, А.С. Грачев^{1,3},
М.С. Машталир⁵, С.А. Поспелов⁵, А.В. Чернышев²**

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

¹195112, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д.45, литера А, 2-Н, офис 812, Россия,

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

²105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, Россия,

³ Национальный исследовательский университет ИТМО,

³197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия,

⁴ ООО «Газпром добыча Надым»,

⁴629736, г. Надым, ул. Пионерская, стр. 14, Россия,

⁵ ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»,

⁵196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 3, к. 2, литера Б, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время для разработки Валанжинских и других глубоко-козалегающих (по сравнению с Сеноманом) залежей применяются установки низкотемпературной сепарации (НТС) с турбодетандерными агрегатами (ТДА). Дожимная компрессорная станция (ДКС) является одним из ключевых технологических объектов, необходимых для обеспечения эффективной работы перспективных технологий подготовки газа по способу НТС с ТДА к транспорту. Целью исследования является обоснование оптимальных режимов работы, а также разработка мероприятий по технологическому развитию дожимной компрессорной станции на основе применения методов моделирования работы центробежных компрессоров, газоперекачивающих агрегатов и, непосредственно, дожимной компрессорной станции. **Метод.** В ходе исследования применялись: метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухмерной аппроксимации. Основу математической модели объектов исследования, применяемой в расчетах технологических режимов работы, составляет газодинамическая характеристика (ГДХ) центробежных компрессоров. **Результат.** Представлены результаты сравнения трех способов моделирования ГДХ (метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухпараметрической аппроксимации) высоконапорных ЦБК на примере ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1, предназначенного для оснащения ГПА единичной мощностью 16,0 МВт в составе промышленных ДКС. Проведен анализ и сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными. **Вывод.** Точность математической модели ГДХ ЦБК в составе промышленных ДКС, обеспечивающих работу установок НТС с ТДА, определяет точность оценки энергопотребления и технического состояния ГПА, а также расчетов перспективных режимов работы газоперекачивающего оборудования, которые выполняются с целью решения ряда прикладных задач, включая определение сроков модернизации оборудования или реконструкции станции.

Ключевые слова: компрессорная станция, газоперекачивающие агрегаты, центробежные компрессоры, высоконапорные центробежные компрессоры, математическое моделирование центробежных компрессоров, метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, установки низкотемпературной сепарации

Для цитирования: М.А. Воронцов, В.Ю. Глазунов, А.С. Грачев, М.С. Машталир, С.А. Пospelov, А.В. Чернышев. Сравнение способов моделирования газодинамических характеристик высоконапорных центробежных компрессоров, обеспечивающих работу промышленных установок низкотемпературной сепарации, на примере модификации с отношением давлений до 1,9...2,1. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Comparison of methods for modeling the gas-dynamic characteristics of high-pressure centrifugal compressors that ensure the operation of field low-temperature separation units using the example of a modification with a pressure ratio of up to 1.9...2.1

М.А. Vorontsov¹⁻³, V.Yu. Glazunov⁴, A.S. Grachev^{1,3}, M.S. Mashtalir⁵, S.A. Pospelov⁵, A.V. Chernyshev²

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC,

¹ 45 Malookhtinsky Ave., letter A, 2-N, office 812, St. Petersburg 195112, Russia,

² N.E. Bauman Moscow State Technical University,

² 2nd Baumanskaya St. 5, p.1, Moscow 105005, Russia,

³ National Research University ITMO,

³ 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

⁴ Gazprom Dobycha Nadym LLC,

⁴ Pionerskaya St., build. 14, Nadym 629736, Russia,

⁵ LLC Gazprom Transgaz St. Petersburg,

⁵ 3 Varshavskaya St., build.2, letter B, St. Petersburg 196128, Russia

Abstract. Objective. Currently, for the development of Valanginian and other deep-laying (compared to the Cenomanian) deposits, low-temperature separation (LTS) units with turboexpander units (TDA) are used, and the booster compressor station (BCS) is one of the key technological facilities necessary to ensure the efficient operation of promising technologies for gas preparation using the NTS method with TDA turboexpander units for transport. The purpose of the study is to substantiate optimal operating modes, as well as to develop measures for the technological development of a booster compressor station based on the use of methods for modeling the operation of centrifugal compressors, gas pumping units and, directly, the booster compressor station. **Method.** The following methods were used: the method of reduced characteristics, the refined method of reduced characteristics, and the two-dimensional approximation method. The basis of the mathematical model of the research objects is the gas-dynamic characteristics of centrifugal compressors. **Result.** The results of a comparison of methods for modeling HDC (reduced characteristics method, refined method of reduced characteristics, two-parameter approximation method) of high-pressure pulp and paper mills are presented using the example of a pulp and paper mill with a pressure ratio of up to 1.9...2.1, intended for equipping gas compressor units with a unit power of 16.0 MW as part of field operations. DKS. An analysis and comparison of the obtained modeling results with actual data was carried out. **Conclusion.** The accuracy of the mathematical model of the GDC PPM as part of the field booster compressor stations that ensure the operation of NTS installations with TDA determines the accuracy of the assessment of energy consumption and the technical condition of the gas pumping units, as well as calculations of future operating modes of gas pumping equipment, which are carried out to solve a number of applied problems, including determining the timing of equipment modernization or reconstruction of the station.

Keywords: compressor station, gas compressor units, centrifugal compressors, high-pressure centrifugal compressors, mathematical modelling of centrifugal compressors, reduced characteristic method, refined reduced characteristic method, low-temperature separation units

For citation: M.A. Vorontsov, V.Yu. Glazunov, A.S. Grachev, M.S. Mashtalir, S.A. Pospelov, A.V. Chernyshev. Comparison of methods for modeling the gas-dynamic characteristics of high-pressure centrifugal compressors that ensure the operation of field

low-temperature separation units, using the example of a modification with a pressure ratio of up to 1.9...2.1. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Введение. По мере снижения пластовых давлений в составе промысловых технологических систем требуется введение и поэтапное технологическое развитие дожимной компрессорной станции (далее – ДКС). Ввод ДКС требуется для устранения «дефицита» рабочего давления и соответствующего обеспечения штатной работы установок подготовки газа, а также обеспечения давления, необходимого для передачи газа потребителям [1-6].

В настоящее время для разработки Валанжинских и других глубокозалегающих (по сравнению с Сеноманом) залежей применяются установки низкотемпературной сепарации (далее – НТС) с турбодетандерными агрегатами (далее – ТДА), и ДКС является одним из ключевых технологических объектов, необходимых для обеспечения эффективной работы перспективных подготовки газа по способу НТС с ТДА к транспорту [7]. Кроме того, ДКС является основным потребителем топливного газа, что определяет повышенное внимание к повышению энергетической эффективности ее работы [3, 4, 6, 8].

Для обоснования оптимальных режимов работы, а также мероприятий по технологическому развитию ДКС (замена сменных проточных частей, ввод ГПА, их переобвязка для последовательной работы и т.п.) широко используют методы математического моделирования работы ДКС [8–12]. Основу математической модели (далее – ММ) ДКС, применяемой в расчетах технологических режимов работы, составляет газодинамическая характеристика (далее – ГДХ) центробежных компрессоров (далее – ЦБК) [10, 11].

Постановка задачи. Известны различные подходы к составлению ММ ЦБК [10–13]: методы, основанные на моделировании потока в проточной части ЦБК [12], методы, основанные на моделировании ГДХ ЦБК [10, 11, 13].

Известны различные методы, основанные на моделировании ГДХ. Также известно, что они обеспечивают различную степень точности результатов при создании ММ высоконапорных модификаций ЦБК с отношением давлений более 1,5 и количеством ступеней сжатия более трех [10, 11].

В связи с этим, а также увеличением потребности в высоконапорных ЦБК природного газа в различных сегментах газовой промышленности [10], исследования, направленные на уточнение существующих способов моделирования ГДХ высоконапорных ЦБК, являются актуальными.

Одним из этапов уточнения ММ является накопление данных о результатах и точности моделирования с использованием различных методов [10].

В данной работе представлены результаты сравнения трех способов моделирования ГДХ (метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухпараметрической аппроксимации) высоконапорных ЦБК на примере ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1, проточная часть которого состоит из четырех ступеней сжатия, предназначенного для оснащения ГПА единичной мощностью 16,0 МВт в составе промысловых ДКС. Проведен анализ и сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными.

Методы исследования. Моделирование ГДХ высоконапорного ЦБК рассматривалось с применением:

- метода приведенных характеристик (далее – МПХ) [13],
- уточненного метода приведенных характеристик (далее – УМПХ) [10, 11],
- метода двухмерной аппроксимации (далее – УМПХ-2D) [10, 11].

При использовании МПХ и УМПХ для получения «поля» ГДХ используют аппроксимацию базовой ГДХ на номинальной частоте вращения в виде зависимостей отношения давлений и политропного КПД от объемного расхода газа на входе в ЦБК $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}})$, $\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{вх пр}})$, полученную экспериментально при частоте вращения 4 900 об/мин.

При реализации метода УМПХ-2D приняты аналогичные зависимости $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}})$ и $\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{вх пр}})$, полученные экспериментально при частотах вращения 4 900 об/мин, 4 300 об/мин и 3 800 об/мин.

Расчеты выполнялись с использованием Microsoft Excel (пересчет методами МПХ и УМПХ, построение графиков) и Mathcad (расчет коэффициентов для двухпараметрического полинома в методе УМПХ-2D).

Обсуждение результатов. Результаты расчетов представлены на рис.1 – 7. Результаты сравнения основных параметров ГДХ ЦБК ($\eta_{\text{пол}}$ и ε), представлены на рис. 1 и 2.

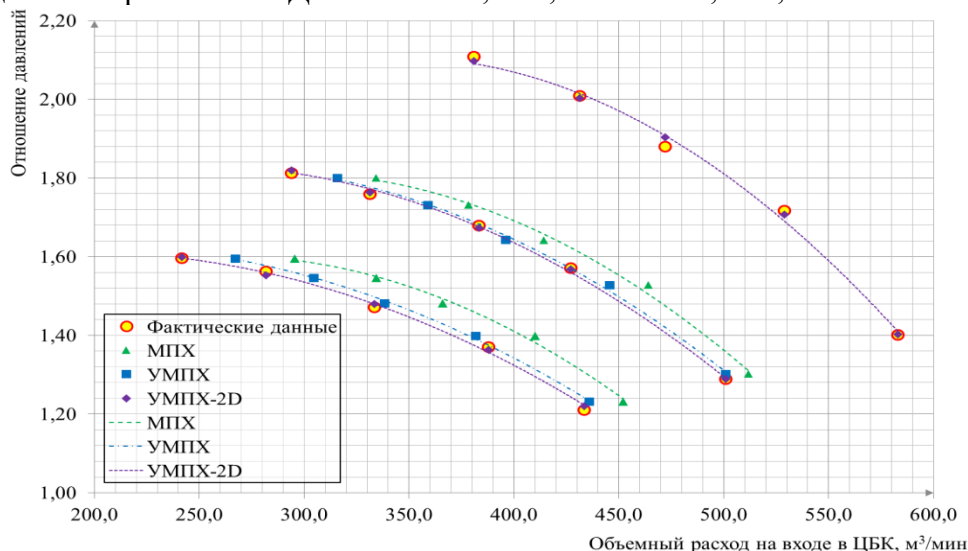
На рис. 3 – 5 представлено сравнение значений политропного КПД в рабочем диапазоне частоты вращения ротора.

На рис. 6 и 7 представлены максимальные погрешности расчета $\eta_{\text{пол}}$ и ε для каждого из примененных методов пересчета характеристик.

Значения погрешностей были получены при сравнении расчетных характеристик с экспериментальными данными при равных объемных расходах ЦБК в рабочем диапазоне расходов и частот вращения ротора ЦБК.

Из анализа данных рис. 1 – 7 следует, что максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных данных составляет:

- 1) для отношений давлений по МПХ – 4,17%, УМПХ – 0,90%, УМПХ-2D – 0,56%;
- 2) для политропного КПД по МПХ – 9,57%, УМПХ – 3,78%, УМПХ-2D – 2,77%.



Параметры приведения ГДХ: $z \cdot R = 488,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $T_{\text{вх}} = 288 \text{ К}$, $P_{\text{вх}} = 2,0 \text{ МПа}$

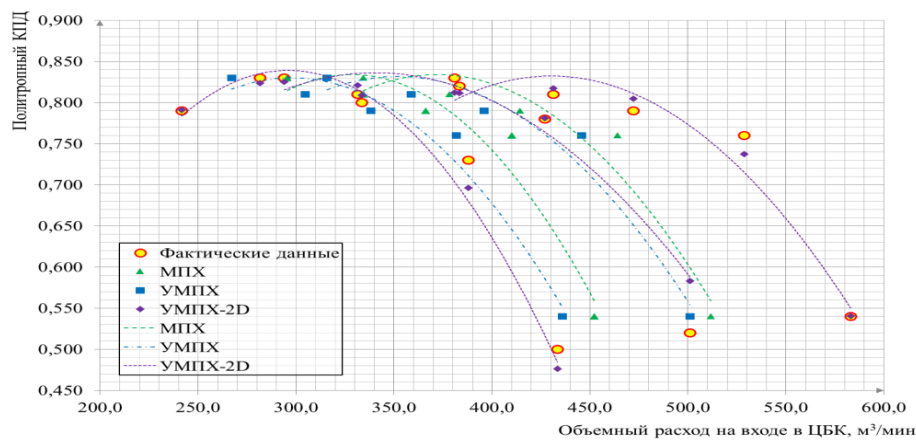
МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двумерной аппроксимации

Рис. 1. Сравнение результата пересчета отношений давлений по различным методикам и экспериментальных данных

Fig. 1. Comparison of the result of recalculation of pressure ratios using various methods and experimental data

Соответственно, погрешность оценки параметров ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1 при использовании МПХ значительно выше, чем при использовании УМПХ, а применение УМПХ-2D позволяет добиться наименьших отклонений результатов моделирования от фактических данных. Для МПХ характерно увеличение погрешности по мере удаления рассчитываемой характеристики от базовой (рис. 6 и 7).

Также наблюдается увеличение погрешности с увеличением объемного расхода, а более детальные исследования данного тренда будут произведены в последующих работах по мере накопления статистической информации о точности методов пересчета ГДХ высоконапорных ЦБК.



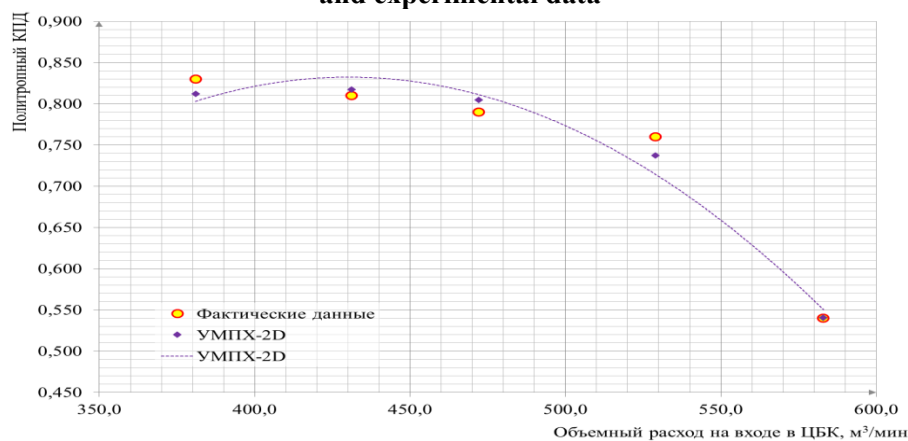
Параметры приведения ГДХ: $z \cdot R = 488,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $T_{\text{ex}} = 288 \text{ К}$, $P_{\text{ex}} = 2,0 \text{ МПа}$

МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,

УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 2. Сравнение результата пересчета КПД политропного по различным методикам и экспериментальных данных

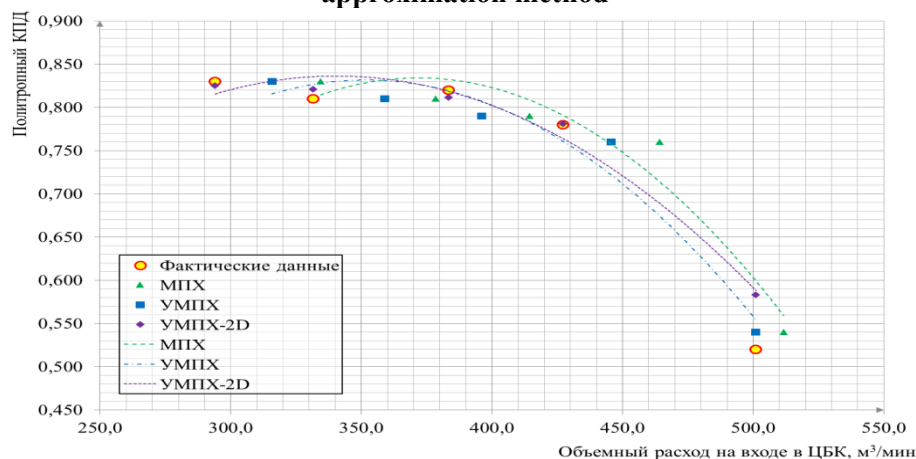
Fig. 2. Comparison of the result of recalculation of polytropic efficiency using various methods and experimental data



УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 3. Политропный КПД при частоте вращения 4 900 об/мин по результатам испытаний и пересчета методом двухмерной аппроксимации

Fig. 3. Polymeric efficiency at 4,900 rpm based on test results and recalculation by two-dimensional approximation method

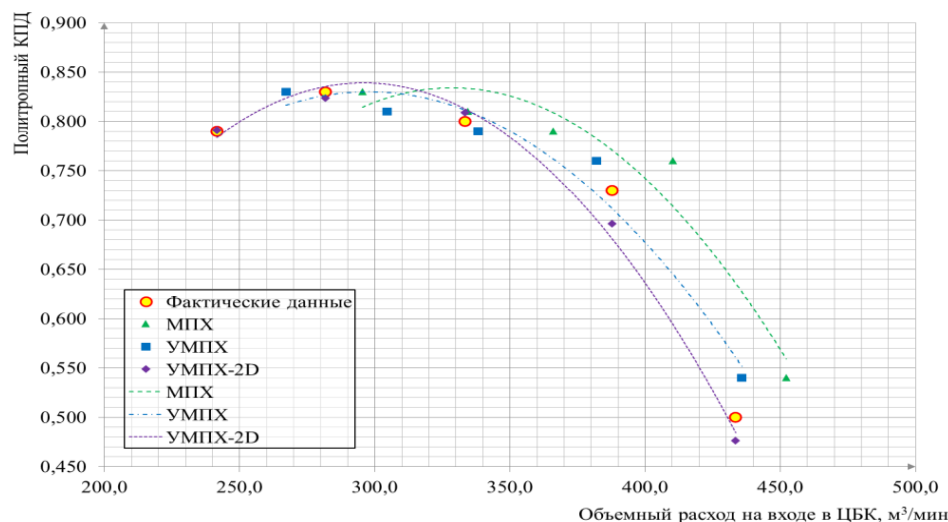


МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,

УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 4. Политропный КПД при частоте вращения 4 300 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

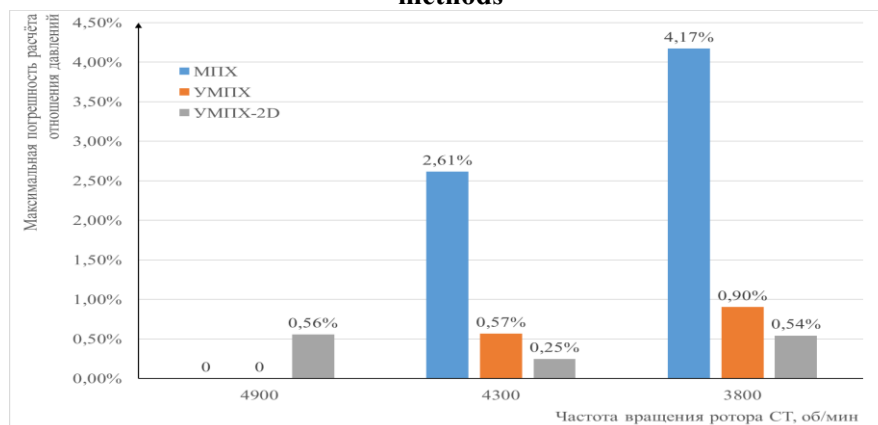
Fig. 4. Polymeric efficiency at 4,300 rpm based on test results and recalculation using various methods



МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,
УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 5. Политропный КПД при частоте вращения 3 800 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

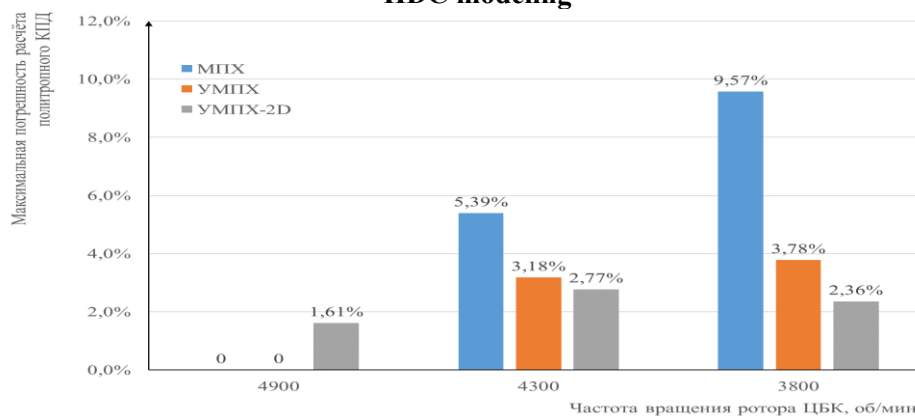
Fig. 5. Polytropic efficiency at 3,800 rpm based on test results and recalculation using various methods



МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,
УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 6. Сравнение точности определения отношения давления для рассмотренных способов моделирования ГДХ

Fig. 6. Comparison of the accuracy of determining the pressure ratio for the considered methods of HDC modeling



МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,
УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 7. Сравнение точности определения политропного КПД для рассмотренных способов моделирования ГДХ

Fig. 7. Comparison of the accuracy of determining the polytropic efficiency for the considered methods of modeling GDC

Полученные результаты в основном коррелируют с результатами, представленными в [10, 11], в том числе, также наблюдается увеличение погрешности с увеличением объемного расхода. Полученные результаты представляют интерес для специалистов в области моделирования работы промысловых ДКС и высоконапорных ЦБК в других областях промышленности.

Кроме того, полученные результаты представляют интерес для накопления статистики с целью разработки подходов к созданию ММ, которые обеспечат повышение точности моделирования высоконапорных ЦБК с использованием ГДХ.

Вывод.

1. Точность математической модели ГДХ ЦБК в составе промысловых ДКС, обеспечивающих работу установок НТС с ТДА, определяет точность оценки энергопотребления и технического состояния ГПА, а также расчетов перспективных режимов работы газоперекачивающего оборудования, которые выполняются с целью решения ряда прикладных задач, включая определение сроков модернизации оборудования или реконструкции станции.

2. По результатам сравнения трех методов математического моделирования ГДХ ЦБК: МПХ, УМПХ и УМПХ-2D – сделаны выводы что при применении метода моделирования УМПХ-2D получены наименьшие погрешности (не более 0,56 % по отношению давлений и не более 2,77 % по КПД), что, в свою очередь, свидетельствует о его наибольшей точности среди рассмотренных методов пересчета ГДХ высоконапорных и многоступенчатых компрессоров.

Данный метод учитывает изменения коэффициента изменения удельного объема, и политропного КПД с изменением условий работы ЦБК. Для использования этого метода потребуется большее количество исходных данных по сравнению с существующими методами – необходимо не менее трех экспериментальных изодром.

3. Для разработки математических моделей ДКС, обеспечивающих работу установок НТС, рекомендуется использовать метод пересчета ГДХ УМПХ-2D.

Это позволит более точно прогнозировать затраты топливно-энергетических ресурсов при работе ДКС, осуществлять оценку технического состояния во всем рабочем диапазоне расхода и частот вращения ротора ЦБК.

Кроме того, повышается оценка сроков модернизации и реконструкции КС, а также точность результатов расчетных исследований, которые проводятся для обоснования соответствующих наиболее рациональных технико-технологических решений.

Библиографический список:

1. Анализ функциональной надежности работы дожимных компрессорных станций при отклонении фактических показателей эксплуатации от проектных значений. Методический подход и практическая значимость / Воронцов М.А., Грачев А.С., Грачева А.О., Петропавлов В.Е., Киркин М.А. // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 1. С. 32-41.
2. Кильдияров С.С. Разработка метода пересчета газодинамических характеристик многоступенчатых центробежных компрессоров на дожимных компрессорных станциях // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 5-6. С. 28-31.
3. Об анализе функциональной надежности работы дожимных компрессорных станций в составе технологических систем обустройства месторождений природного газа / Воронцов М.А., Петропавлов В.Е., Грачев А.С., Козлов А.В. // Компрессорные технологии. 2022. № 6. С. 7-10.
4. Методические подходы к оценке энергоэффективности технологических процессов добычи газа / Воронцов М.А., Хворов Г.А., Нурдинова С.А., Маришкин В.А. // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2017. № 5 (33). С. 42-49.
5. Перспективы применения распределенного компримирования в промысловых системах добычи газа / Воронцов М.А., к.т.н. Ротов А.А., Марущенко И.В., Лаптев Е.М. // Вести газовой науки №4 (20) / 2014.
6. Воронцов М.А., Грачев А.С. О турбомашинах и компрессорах на газовом промысле // Магистральные и промысловые трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт: Научно-технический сборник. Том 2. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 43-49.

7. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промышленных технологических объектах газовой промышленности России / Хетагуров В.А., Слугин П.П., Воронцов М.А., Кубанов А.Н. // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). С. 14-22.
8. Мониторинг энергоэффективности компримирования газа ДКС на основе фактических характеристик центробежных многоступенчатых компрессоров / Кильдияров С.С., Глазунов В.Ю., Меньшиков С.Н., Полозов В.Н. // Газовая промышленность. 2015. № 2 (718). С. 50-54.
9. Глазунов В.Ю., Хафизов А.Р., Давлетов К.М. Корректировка характеристик газоперекачивающих агрегатов (ГПА) дожимных компрессорных станций (ДКС) в процессе эксплуатации // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2013. № 6. С. 210-227.
10. Анализ методов моделирования режимов работы компрессорного оборудования, обеспечивающего работу промысловых установок низкотемпературной сепарации / Воронцов М.А., Глазунов В.Ю., Грачев А.С., Машталир М.С., Пospelov С.А., Чернышев А.В. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50. № 4. С. 6-16.
11. Воронцов М.А., Глазунов В.Ю., Лопатин А.С. Математическое моделирование режимов работы высоконапорного многоступенчатого центробежного компрессора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 25-30.
12. Бухарин Н. Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров.— Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983.— 214 с.
13. Методы представления газодинамических характеристик центробежных компрессоров природного газа / Барцев И.В., Сальников С.Ю., Синицын Н.С. // Сб. Трудов ВНИИГАЗа. Проблемы развития, реконструкции и эксплуатации газотранспортных систем. М., 2003 - С.314-322.

References:

1. Analysis of functional reliability of booster compressor stations operation at deviation of actual operation indicators from design values. Methodical approach and practical significance / Vorontsov, M.A.; Grachev, A.S.; Gracheva, A.O.; Petropavlov, V.E.; Kirkin, M.A. *Compressor engineering and pneumatics*. 2023;1: 32-41. (In Russ)
2. Kildiyarov S.S. Development of the method of recalculation of gas-dynamic characteristics of multistage centrifugal compressors at booster compressor stations. *Transportation and storage of oil products and hydrocarbon raw materials*. 2022;5-6: 28-31. (In Russ)
3. On the analysis of the functional reliability of the booster compressor stations operation as a part of the technological systems of the natural gas fields development. Vorontsov, M.A.; Petropavlov, V.E.; Grachev, A.S.; Kozlov, A.V. *Compressor technologies*. 2022;6: 7-10. (In Russ)
4. Methodical approaches to energy efficiency assessment of technological processes of gas production / Vorontsov M.A., Khvorov G.A., Nurdinova S.A., Marishkin V.A. *Scientific and Technical Collection Vesti gazovoy nauki*. 2017;5 (33):42-49. (In Russ)
5. Prospects of application of distributed compression in field gas production systems / Vorontsov M.A., PhD Rotov A.A., Marushchenko I.V., Laptev E.M. *Vesti gazovoy nauki*. 2014; 4 (20) (In Russ)
6. Vorontsov M.A., Grachev A.S. About turbomachines and compressors at the gas field // Trunk and field pipelines: design, construction, operation, repair: Scientific and Technical Collection. Vol. 2. - Moscow: Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, 2017; 2: 43-49. (In Russ)
7. Experience and prospects of turboexpander units application at field process facilities of Russian gas industry / Khetagurov V.A., Slugin P.P., Vorontsov M.A., Kubanov A.N. *Gas Industry*. 2018;11 (777): 14-22. (In Russ)
8. Monitoring of energy efficiency of DCS gas compression based on actual characteristics of centrifugal multistage compressors / Kildiyarov S.S., Glazunov V.Yu., Menshikov S.N., Polozov V.N. *Gas Industry*. 2015;2 (718): 50-54. (In Russ)
9. Glazunov V.Yu., Khafizov A.R., Davletov K.M. Correction of characteristics of gas pumping units (GPA) of booster compressor stations (BCS) in the process of operation. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2013;6: 210-227. (In Russ)
10. Analysis of methods for modeling the modes of operation of compressor equipment, providing the operation of field units of low-temperature separation / Vorontsov, M.A.; Glazunov, V.Y.; Grachev, A.S.; Mashtalir, M.S.; Pospelov, S.A.; Chernyshev, A.V. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(4):6-16. (In Russ)
11. Vorontsov M.A., Glazunov V.Yu., Lopatin A.S. Mathematical modeling of operation modes of high-pressure multistage centrifugal compressor. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*. 2016;1: 25-30. (In Russ)
12. Bukharin N. N. Modeling of characteristics of centrifugal compressors.- L.: Mashinostroenie, Leningr. department, 1983; 214. (In Russ)
13. Methods of representation of gas dynamic characteristics of natural gas centrifugal compressors / Bartsev, I.V.; Salnikov, S.Y.; Sinitsyn, N.S. *Proceedings of VNIIGAZ. Problems of Development, Reconstruction and Operation of Gas Transportation Systems*. M., 2003;314-322. (In Russ)

Сведения об авторах:

Воронцов Михаил Александрович, кандидат технических наук, начальник лаборатории промышленных компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» ИТМО; m_vorontsov@list.ru

Глазунов Валерий Юрьевич, начальник службы мониторинга технологических процессов добычи, сбора и подготовки газа инженерно-технического центра; vglazunov@mail.ru

Грачев Анатолий Сергеевич, научный сотрудник лаборатории промышленных компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» университета ИТМО; grachev.anatoliy@yandex.ru

Машталир Мария Сергеевна, ведущий инженер группы по энергосбережению и энергоэффективности отдела технического развития управления перспективного развития; mashtalir.m@mail.ru

Поспелов Сергей Александрович, ведущий инженер испытательной лаборатории службы диагностики инженерно-технического центра; pospelov_s91@mail.ru

Чернышев Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника»; chernyshev@bmstu.ru

Information about authors:

Mikhail A. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Field Compressor and Turbo-Refrigeration Systems of Gazprom VNIIGAZ LLC, Assoc. Prof. of the Department of Vacuum and Compressor Engineering, MSTU. N.E. Bauman, Assoc. Prof., Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" of ITMO University; m_vorontsov@list.ru

Valery Yu. Glazunov, Head of the monitoring service for technological processes of gas production, collection and preparation of the engineering and technical center; vglazunov@mail.ru

Anatoly S. Grachev, Researcher at the laboratory of field compressor and turbo-refrigeration systems of Gazprom VNIIGAZ LLC, graduate student at the educational center "Energy Efficient Engineering Systems" of ITMO University; grachev.anatoliy@yandex.ru

Maria S. Mashtalir, Leading engineer of the group for energy saving and energy efficiency of the technical development department of the long-term development department; mashtalir.m@mail.ru

Sergey A. Pospelov, Leading engineer of the testing laboratory of the diagnostic service of the engineering and technical center; pospelov_s91@mail.ru

Andrey V. Chernyshev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Vacuum and Compressor Engineering; chernyshev@bmstu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 02.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 01.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 01.07.2024.