

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК
НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ ВЭР
В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД**

Аннотация: В соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности вопросы энергосбережения приобретают особую значимость. В системе ПАО ГАЗПРОМ вопросы, озвученные выше, трансформированы в два направления: утилизация тепла уходящих газов газотурбинных установок и минимизация эмиссии загрязняющих веществ от газотранспортной системы, что связано с оптимизацией экологических характеристик газотурбинных установок на компрессорных станциях. С этой целью теплота уходящих газов газотурбинных установок использована в комбинированных газопаровых установках для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия может использоваться для собственных нужд. Таким образом, решаются сразу две важные задачи: утилизация тепла уходящих газов ГТУ и обеспечение электроэнергией для собственных нужд. Решение этих проблем представлены в предлагаемой статье.

Ключевые слова: Тепло газотурбинных установок, загрязняющие вещества, генерация электрической энергии, утилизационная паротурбинная установка, органические рабочие тела, пентановая технология, турбодетандер.

Annotation: *In accordance with the Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FZ “On Energy Saving and Improving Energy Efficiency,” energy saving issues are of particular importance. In the system of PJSC GAZPROM, the issues voiced above are transformed into two directions: recycling the heat of exhaust gases of gas turbine units and minimizing the emission of pollutants from the gas transportation system, which is associated with optimizing the environmental characteristics of gas turbine units at compressor stations.*

For this purpose, the heat from the exhaust gases of gas turbine units is used in combined gas-steam units to generate electricity. The generated electricity can be used for your own needs. Thus, two important tasks are solved at once: recycling the heat from the flue gases of the gas turbine plant and providing electricity for one’s own needs. The solution to these problems is presented in this article.

Key words: *Heat of gas turbine units, pollutants, generation of electrical energy, utilization steam turbine unit, organic working fluids, pentane technology, turboexpander.*

Введение

В соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» вопросы энергосбережения приобретают особую значимость [1]. Кроме того, как известно, вопросы экологии тесно связаны с указанной проблемой.

Одним из направлений энергосбережения в системе ПАО ГАЗПРОМ является утилизация тепла уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ). Особенно актуальным становится вопрос, связанный с эмиссией загрязняющих веществ (ЗВ) от газотранспортной системы. Также большое значение приобретают экологические характеристики ГТУ, которые применяются для привода ГПА.

Обеспечение линейных компрессорных станций (КС) и других объектов ЕСГ электроэнергией на собственные нужды является одной из актуальных задач. В то же время теплота уходящих газов ГТУ может быть использована в комбинированных газопаровых установках (ГПУ) для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия может использоваться для собственных нужд КС или другими находящимися по близости промышленными и гражданскими объектами. Таким образом, решаются сразу две важные задачи: утилизация тепла уходящих газов ГТУ и обеспечение КС электроэнергией на собственные нужды. В этом заключена теоретическая и практическая значимость решаемой проблемы.

На основании вышеуказанных документов, утвержденных на государственном уровне [1] и конкретизированных в документах [2–5] ПАО Газпром, сформулированы цель и задачи представленного исследования.

Целью представленной научной работы является разработка научно-технической основы создания утилизационной паротурбинной установки (УПТУ) для обеспечения газоперекачивающей компрессорной станции электроэнергией собственных нужд с учетом снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

1. Определение потребляемой электроэнергии и необходимой мощности ВЭР для собственных нужд КС «Сызрань».

На КС «Сызрань» работают 3 компрессорных цеха для повышения давления в технологическом коридоре магистральных газопроводов «Челябинск – Петровск», «Нов. Уренгой – Новопсков», «Нов. Уренгой – Петровск». На газопроводе «Челябинск – Петровск» работает КЦ-1, установлены газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом ГТК-10-4 с ЦН-370-18-1 в количестве 8 штук. На газопроводе «Нов. Уренгой – Петровск» работает КЦ-2, установлены газоперекачивающие агрегаты

с газотурбинным приводом ГПА-6,3 с НЦВ-6,3-76 в количестве 10 штук. На газопроводе «Нов. Уренгой – Новопсков» работает КЦ-3, установлены газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом НК-16СТ с НЦ-16-76 в количестве 6 штук. Всего на КС «Сызрань» установлены газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом НК-16СТ с НЦ-16-76 в количестве 24 штук, выделяющие ВЭР, необходимую для трансформации в электроэнергию собственных нужд.

С другой стороны, из графика, представленного на рис. 1, видно, что потребление электроэнергии за 2020 год КС «Сызрань» варьируется от 10 МВт зимой до 4,5 МВт летом.

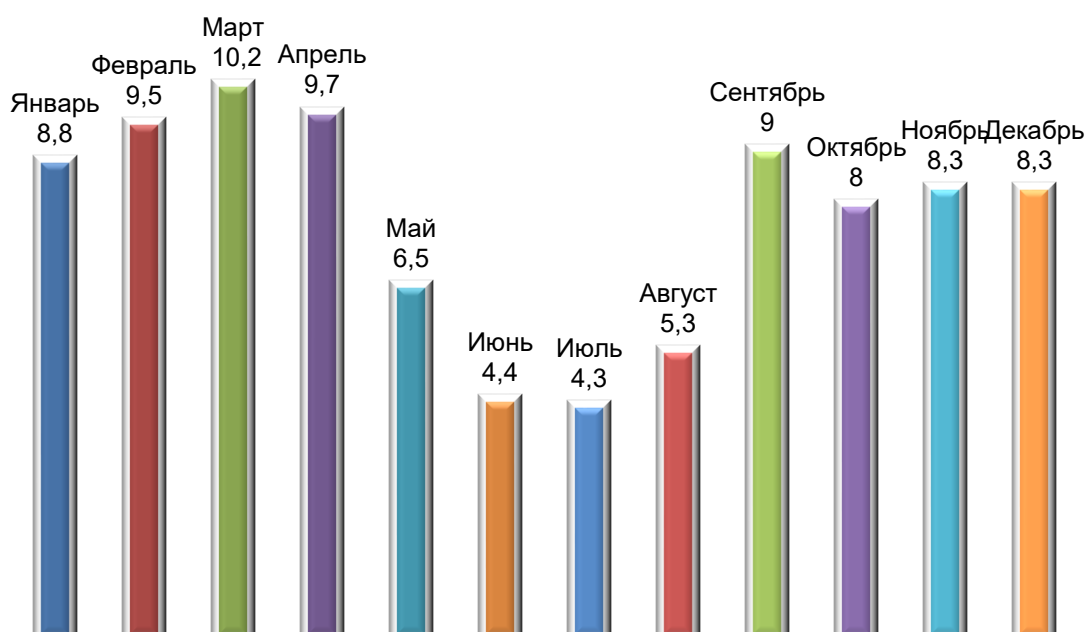


Рисунок 1. Потребление электроэнергии КС «Сызрань» за 2020 в МВт

На основании этого графика произведена средняя оценка требуемой электроэнергии, которую необходимо получить из ВЭР, используя известные технологии. Таким образом, мощность собственных нужд КС «Сызрань» и уровень энергетического потенциала выхлопных газов ГПА-Ц16 должны быть сопоставимы.

Для оценки теплового потенциала выхлопных газов после ГТУ был произведен расчет характеристик ГПА-Ц-16 на номинальном режиме, расчет мощностной характеристики ГПА-Ц-16 с последующим определением параметров НК-16СТ, работающего в составе ГПА-Ц-16, при изменении температуры газа перед турбиной, построением зависимости температуры выхлопных газов и их расхода при изменении режима работы ГПА.

Рассчитанные параметры ГПА-Ц-16 на режиме частичной мощности позволили построить зависимость изменения КПД, мощности и температуры рабочего тела во всем диапазоне рабочего режима ГПА (см. графики рис. 2, а, б, в, г).

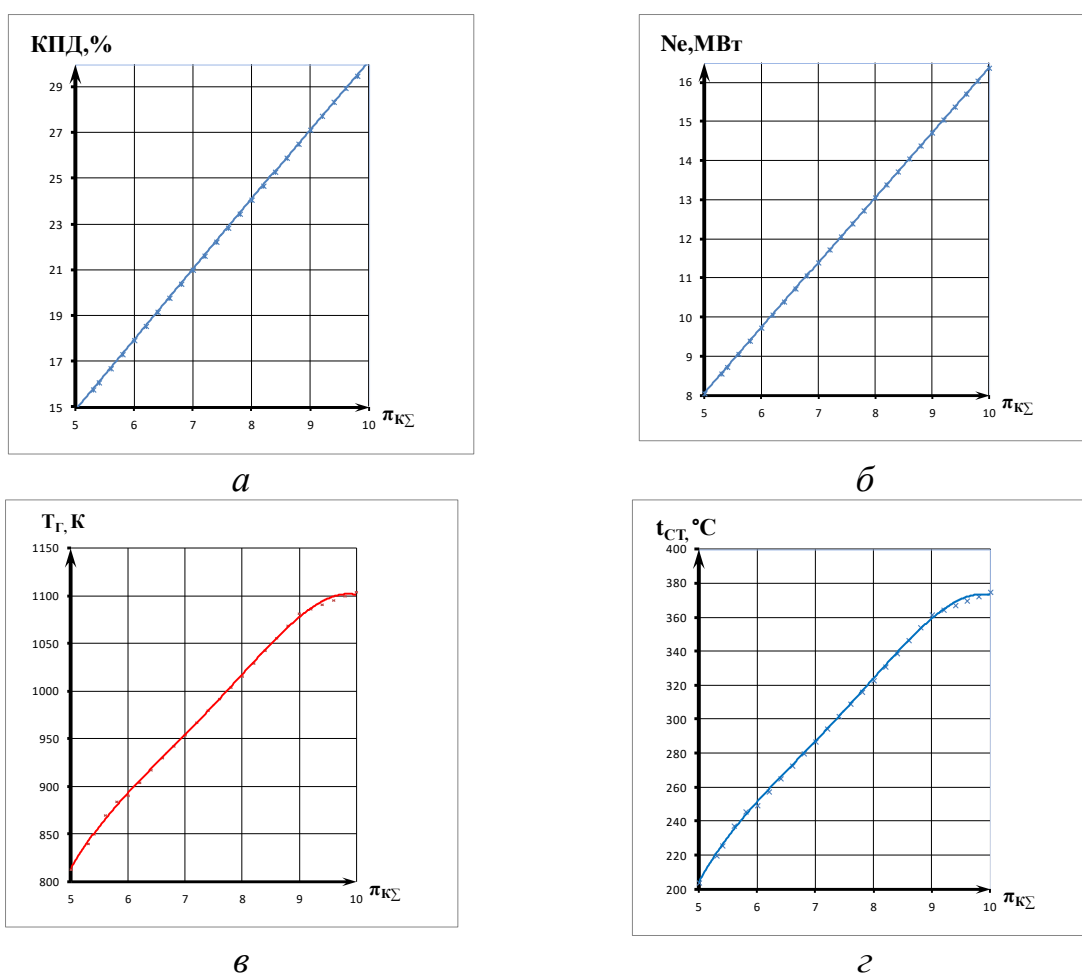


Рисунок 2. Изменение КПД (а), мощности (б) и температуры рабочего тела(в, г) при $N_e = var$, $T_{вх} = const$

Анализ полученных расчетных параметров показал, что расход рабочего тела изменяется от 30 до 60 кг/с, а температура выхлопных газов – от 200 °С до 350 °С. Эти параметры определяют тепловой потенциал выхлопных газов после турбины ГПА. Для одного ГПА количество теплоты, теряемое с выхлопными газами, составляет от 7,5 МДж до 28 МДж.

2. Расчет климатической характеристики ГПА-Ц-16

Определение параметров НК-16СТ, работающего в составе ГПА-Ц-16, при изменении температуры окружающего воздуха (климатическая характеристика) позволило сделать следующий обоснованный вывод.

Проведен анализ изменения КПД, мощности и температуры рабочего тела во всем диапазоне рабочего режима ГПА, которые представлены на графиках рис. 3.

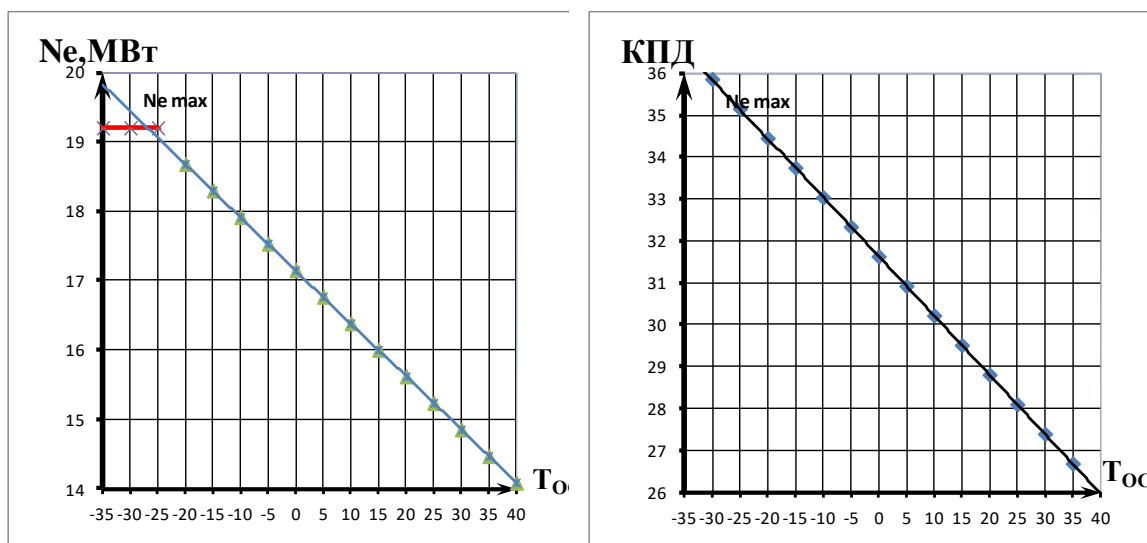


Рисунок 3. Изменение КПД, мощности при $T_{вх} = var$, $T_{Г} = const$

Из графической зависимости на рис. 5 видно, что в зимний период времени ГПА имеют избыток мощности и при температуре -25 °С в автоматическом режиме мощность ГПА ограничивается. С ростом

температуры окружающего воздуха ГПА будет иметь недостаток мощности и работать с низкими КПД.

Анализ полученных результатов показал, что при изменении температуры окружающего воздуха изменения температуры выхлопных газов практически не происходит и расход продуктов сгорания остается постоянным. Следовательно, теплота уходящих газов практически не изменяется и составляет порядка 28 МДж во всем климатическом диапазоне эксплуатации ГПА. Изменение количества теплоты уходящих газов определяется только режимом работы ГПА.

3. Анализ возможности применения органических рабочих тел (ОРТ) в УПТУ

Использование в технологическом процессе КЦ бинарного цикла

Бинарный парогазовый цикл представляет собой инновационную технологию, которая активно используется на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Этот цикл сочетает в себе преимущества работы паровой турбины и газовой турбины, что позволяет значительно повысить эффективность и экономичность процесса компрессии газа на станциях.

Если в цикле в качестве рабочего тела используются НРТ – низкокипящие рабочие тела, представляющие собой органические или синтетические вещества с низкой температурой кипения, то такая установка будет работать по органическому циклу Ренкина.

Применение подобных систем для получения электроэнергии из различных источников тепла получили название ORC-технологии (ОЦР-технологии).

Одним из распространенных низкокипящих рабочих тел является органическая жидкость – пентан C_5H_{12} (отсюда и название – «пентановая технология»). До температуры $+36\text{ }^{\circ}C$ пентан находится в жидком состоянии,

а после $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$ переходит в газообразное состояние. Примерами других низкокипящих рабочих тел могут быть углеводороды (бутан, пропан), хладоны (R11, R12, R114, R123, R245+a), аммиак, толуол, дифенил, силиконовое масло, а также CO_2 .

В данной работе за низкокипящие рабочие тела выбран пентан.

Под давлением 1,5–1,8 МПа газообразные низкокипящие рабочие тела подаются в турбодетандер [6, 7], который в паре с генератором вырабатывает электрическую энергию.

Типовая схема электростанции (системы утилизации тепла) на основе органического цикла Ренкина представлена на рис. 4.

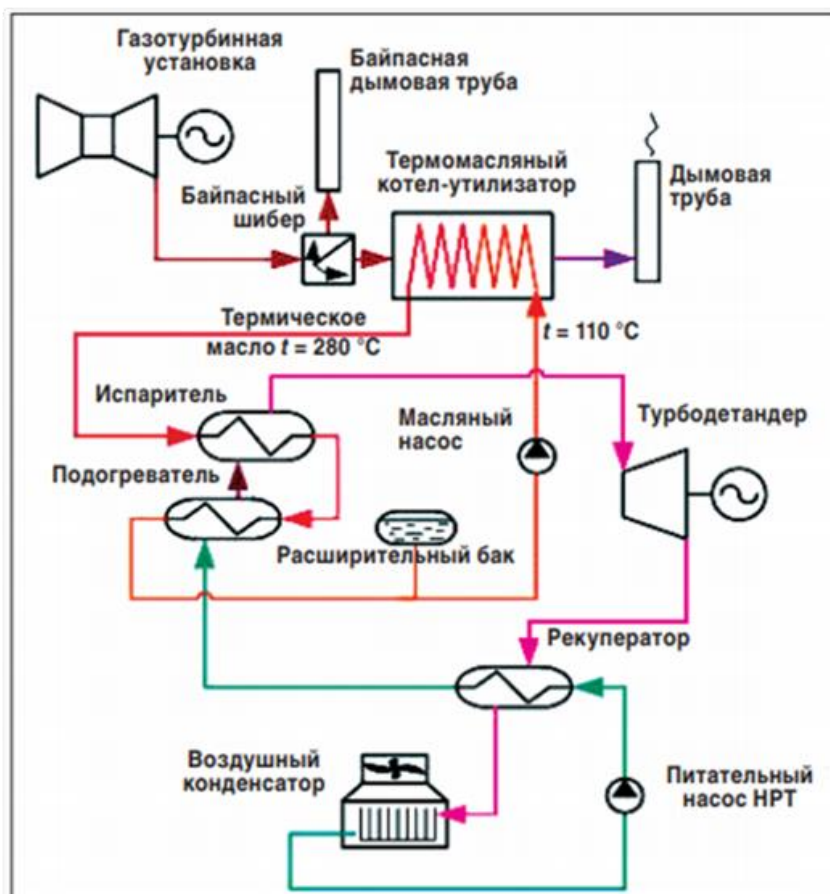


Рисунок 4. Схема системы утилизации тепла на основе пентановой технологии

Основные ее части – это термомасляный утилизационный котел, турбодетандер с электрогенератором и различные теплообменные блоки (испаритель, подогреватель, рекуператор и воздушный конденсатор).

Выхлопные газы от ГТУ через переключающий шибер (дивертор) поступают в термомасляный котел. Переключающий шибер позволяет не останавливать работу газовой турбины в случае необходимости прекращения работы системы утилизации. В первичном контуре системы применяется термическое масло. Это вызвано тем, что большинство НРТ – горючие вещества, а температура выхлопных газов у современных ГТУ достигает 500 °С. Термомасло более устойчиво к высоким температурам. Температура термического масла на входе в утилизационный котел находится в пределах 90–130 °С, на выходе – 280–310 °С.

Нагретое масло передает тепло НРТ в подогревателе и испарителе. Здесь происходит процесс парообразования – из жидкого состояния органическая жидкость переходит в газообразное и по трубопроводу направляется в турбодетандер.

Расширяющийся газ в турбодетандере вращает генератор со скоростью 1500 об/мин, который вырабатывает электроэнергию.

Отработавшее после турбины НРТ поступает в рекуператор и далее в воздушный конденсатор. После конденсатора оно насосами направляется в пароперегреватель, где подогревается до 220–250 °С и затем снова направляется в турбину.

4. Разработка технологии утилизации тепла на КС «Сызрань»

Автором был проведен расчет основных параметров тепловой схемы ГПУ с органическим рабочим телом. Для установки утилизационных комплексов на КС «Сызрань» выбран цех № 3 (см. рис. 5).



Рисунок 5. КС «Сызрань», Цех № 3

Цех № 3 состоит из пяти газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-16, в выхлопном тракте которых установлены водогрейные УТО.

Принятые компоновочные решения позволят независимо от того, какой агрегат находится в работе, всегда иметь возможность обеспечить ОРС-установку необходимым теплом.

Предлагается следующее компоновочное решение. Так как потребность в электроэнергии на собственные нужды КС составляет 8 МВт, установка ОРС будет утилизировать не все тепло выхлопных газов и вырабатывать только 9 МВт электроэнергии (из 13 возможных). Полезная мощность составит 8 МВт (рис. 6).

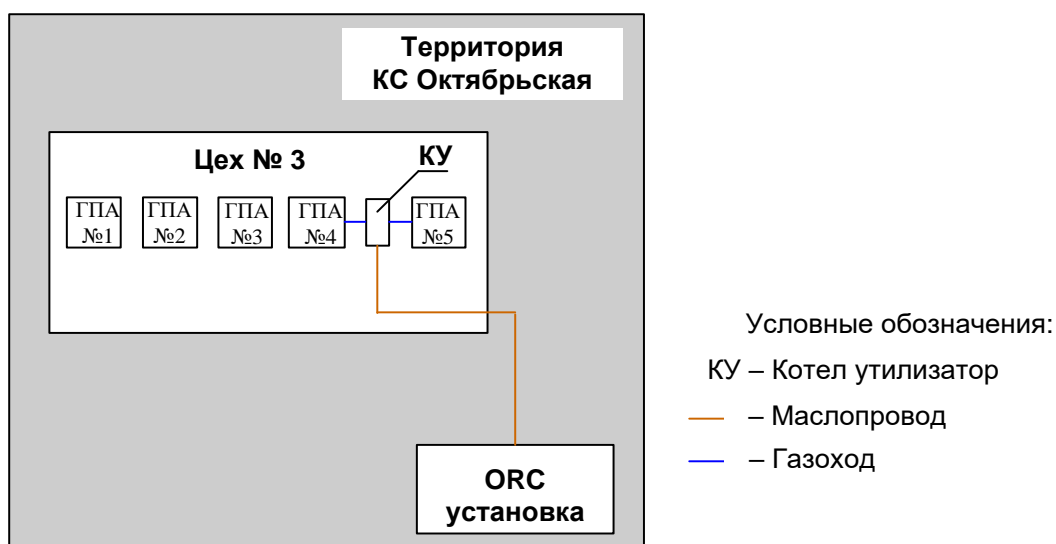


Рисунок 6. Принципиальная схема утилизационного комплекса

В этом варианте устанавливается одна ORC-установка электрической мощностью 9,1 МВт (на клеммах генератора), которая располагается на территории КС. Комплекс утилизирует не все тепло выхлопных газов ГПА, а только часть, необходимую для покрытия собственных нужд КС. В цехе предусматривается установка одного термомасляного котла, рассчитанного на утилизацию тепла, необходимого для выработки 9,1 МВт_{эл}. От термомасляного котла к установке подводится маслопровод (прямой и обратный) по эстакаде.

Данный вариант полностью обеспечивает недорогой электроэнергией собственные нужды КС.

Заключение

В представленной работе убедительно показана целесообразность применения турбодетандерных установок на объектах магистрального трубопроводного транспорта газа.

Предложенное решение по технической реализации трансформации тепловой энергии в электрическую имеет следующие достоинства:

1. У рассматриваемого рабочего тела в рассмотренном цикле невозможно появление конденсата в конце процесса расширения.
2. Отсутствие потерь энергии, обусловленных отсутствием конденсата (п. 1).
3. Отсутствие эрозии лопаток рабочих колес.
4. Отсутствие явления ползучести.

Процесс расширения пентана в турбине идет при малом значении изоэнтропийного теплоперепада энтальпии. Это позволяет выполнить турбину одно-, трехступенчатой, что существенно упрощает конструкцию турбины и снижает капитальные затраты на ее изготовление.

Использованные источники

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. ПАО «ГАЗПРОМ». План мероприятий по повышению операционной эффективности и оптимизации расходов на 2024 год газотранспортных дочерних обществ ПАО «Газпром» и ООО «ГазпромПХГ». Утверждено 18 апреля 2024 года.
3. ПАО «Газпром». Распоряжение номер 89 от 16 марта 2023 года «Об утверждении программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности ПАО «Газпром» на 2023–2025 годы».
4. Протокол заседания координационного комитета ПАО «Газпром» по вопросам рационального природопользования от 30 августа 2023 года. Санкт-Петербург.
5. Санкт-Петербург. ПАО Газпром. Руководителем дочерних обществ ПАО «Газпром» и организаций. Тема: «Об объемах сохранения газа с применением МКС на 2024–2026 годы».
6. Газотурбодетандерные энергетические установки собственных нужд компрессорных станций магистральных газопроводов / В. В. Бирюк, Л. П. Шелудько, А. А. Шиманов, К. Ю. Шабанов. – 2015. – 3 с.
7. Реализация потенциала энергосбережения и повышение энергетической эффективности ПАО «Газпром» на основе применения турбодетандерных технологий / И. А. Яценко, Г. А. Хворов, М. В. Юмашев, Е. В. Юров // Газовая промышленность. – 2017. – № 750. – С. 60–63.