

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **042762**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

- (45) Дата публикации и выдачи патента  
**2023.03.22**
- (21) Номер заявки  
**202291261**
- (22) Дата подачи заявки  
**2020.09.07**
- (51) Int. Cl. **F01D 11/00** (2006.01)  
**F01D 15/10** (2006.01)  
**F02C 1/02** (2006.01)  
**F01D 1/10** (2006.01)  
**F01D 17/18** (2006.01)

---

(54) **ТУРБОДЕТАНДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА**

---

- (31) **2019141058**
- (32) **2019.12.12**
- (33) **RU**
- (43) **2022.09.19**
- (86) **PCT/RU2020/000470**
- (87) **WO 2021/118398 2021.06.17**
- (71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"АЭРОГАЗ" (RU)**
- (72) Изобретатель:  
**Гуров Валерий Игнатьевич, Имаев  
Салават Зайнетдинович, Непомнящий  
Алексей Дмитриевич (RU)**
- (74) Представитель:  
**Юркин А.А. (RU)**
- (56) **RU-C2-2386818  
CN-B-104791015  
RU-C2-2564173  
SU-A1-228381  
SU-A1-1774033**

- 
- (57) Изобретение может быть использовано в области газоснабжения для утилизации энергии потока сжатого природного газа, одновременного получения механической энергии и хладоресурса. Турбодетандерная энергетическая установка содержит турбодетандер, подключенный к источнику газа высокого давления на входе и потребителю газа низкого давления на выходе. Турбодетандер выполнен в виде трехступенчатой лопаточной осевой машины с парциальным сопловым аппаратом. На выходе турбодетандера установлена заслонка. Рабочие колеса каждой ступени турбодетандера имеют нулевую или близкую к нулевой степень реактивности. Высота лопаток рабочего колеса первой ступени не превышает 0,02 м, а окружная скорость вращения рабочего вала не превышает 7 м/с. В качестве опор для рабочего вала использованы подшипники качения. Технический результат заключается в уменьшении внутренних утечек редуцируемого газа в проточной части лопаточной машины и в уплотнениях вала.
- 

**042762**  
**B1**

**042762**  
**B1**

Изобретение относится к области энергетического машиностроения, в частности к турбодетандерам, и может быть использовано в области газоснабжения для утилизации энергии потока сжатого природного газа, одновременного получения механической энергии и хладоресурса.

Известна турбодетандерная энергетическая установка (патент РФ № 185177), содержащая турбодетандер, соединенный с магистральным трубопроводом, и блок управления. На входе турбодетандера установлен дроссель с возможностью изменения диаметра проходного сечения.

Недостатком установки является выполнение регулирующего устройства на входе в турбодетандер в виде дросселя для изменения диаметра проходного сечения. Такое выполнение регулирующего устройства увеличивает утечки газа и соответственно снижает КПД установки в целом.

Известна установка (патент РФ № 2005897) для работы на природном газе, в которой турбодетандер, подсоединенный механически к электрогенератору и к воздушному компрессору, газодинамически через газоздушный теплообменник связан с воздушным компрессором. Поддержание требуемых значений температуры и давления природного газа в выходной магистрали осуществляется с помощью регулируемого соплового аппарата и органа регулирования перепускной магистрали. Мощность, вырабатываемая турбодетандером, сообщается потребителю и воздушному компрессору. В результате воздух после компрессора и теплообменника поступает в воздушную магистраль, где разделяется на два потока. После воздушного турбодетандера воздух снижает свою температуру, и в итоге потребитель получает два потока холодного и горячего воздуха, а также свободную механическую энергию за счет энергии редуцируемого давления природного газа.

Недостатком установки является ее низкая надежность работы из-за возможности смешения в газоздушном тракте природного газа и воздуха с образованием гремучей смеси. Кроме того, использование регулируемых сопловых аппаратов ТД при поддержании постоянства мощности приводит к неизбежным утечкам природного газа.

Известны другие технические решения (см. патенты РФ № 2013615, 2264581, 2317430, 2386818), в которых реализованы различные подходы к повышению эффективности редуцирования давления газа с одновременным поддержанием заданного уровня мощности установки.

Наиболее близким техническим решением является турбодетандерная энергетическая установка, предназначенная для одновременного получения механической энергии и хладоресурса, содержащая турбодетандер, подключенный к источнику газа высокого давления на входе и потребителю газа низкого давления на выходе, и регулирующее устройство, выполненное в виде парциального соплового аппарата (патент РФ № 2386818).

В указанном техническом решении задача исключения энергетических потерь, возникающих за счет утечек газа во внешнюю среду, решается кардинальным образом за счет размещения установки в герметичной капсуле. Редуцируемый газ, проникающий через зазоры и неплотности тракта лопаточной машины, аккумулируется в полости герметичной капсулы и затем утилизируется. Вместе с тем, внутренние утечки, в частности утечки через радиальный зазор, ухудшающие КПД лопаточной машины, остались на прежнем уровне. Кроме того, размещение установки в герметичной капсуле возможно лишь для установок небольшой мощности - до 600 кВт. Для установок больших мощностей необходимы другие технические решения.

Техническая проблема, решение которой обеспечивается при реализации заявленного технического решения, заключается в повышении КПД турбодетандерной энергетической установки. Причем предлагаемое техническое решение применимо для установок различной мощности.

Технический результат, обеспечиваемый изобретением, заключается в уменьшении внутренних утечек редуцируемого газа в проточной части лопаточной машины и в уплотнениях вала.

Заявленный технический результат достигается тем, что турбодетандерная энергетическая установка, предназначенная для одновременного получения механической энергии и хладоресурса, содержит турбодетандер, подключенный к источнику газа высокого давления на входе и потребителю газа низкого давления на выходе, где в качестве турбодетандера используется лопаточная осевая машина с устройством для регулирования парциальности в виде парциального соплового аппарата, отличающаяся тем, что лопаточная осевая машина выполнена трехступенчатой, каждая ступень которой снабжена парциальным сопловым аппаратом, выполненным с возможностью регулирования степени парциальности каждой ступени, рабочие колеса каждой ступени имеют нулевую или близкую к нулевой степень реактивности, высота лопаток рабочего колеса первой ступени не превышает 0,02 м, а окружная скорость вращения рабочего вала не превышает 7 м/с, причем в качестве опор для рабочего вала использованы подшипники качения.

Вся совокупность признаков представляет собой совокупность существенных признаков, поскольку каждый из признаков в отдельности и все они в совокупности работают на достижение заявленного технического результата.

Так, выполнение лопаточной машины, состоящей из трех ступеней, обеспечивает оптимальную, с точки зрения величины утечек газа через радиальный зазор, степень понижения давления в каждой ступени.

Наличие парциального соплового аппарата в составе каждой ступени обеспечивает формирование

оптимальных параметров потока по скорости и характеру течения в каналах проточной части и позволяет уменьшить утечки через радиальный зазор и между ступенями лопаточной машины.

Выполнение рабочих колес каждой ступени с нулевой или близкой к нулевой степенью реактивности снижает перепад давления между корытом и спинкой лопатки рабочего колеса, что благотворно сказывается на величине утечек.

Выполнение рабочего колеса с высотой лопатки не более 0,02 м и обеспечение окружной скорости вращения рабочего вала не более 7 м/с позволяют сконструировать рабочее колесо, которое обеспечивает получение минимального радиального зазора, так как рабочие деформации в таком случае (удлинение лопатки, вибрационные перемещения и пр.) оказывают очень незначительное влияние на изменение радиального зазора.

Кроме того, ограничение окружной скорости вращения рабочего колеса позволяет использовать подшипники качения, что, в свою очередь, уменьшает радиальные перемещения вращающегося вала и позволяет оптимизировать величину радиального зазора. Низкая окружная скорость вращения вала, установленного в подшипники качения, дает возможность уменьшить зазоры между валом и корпусом и использовать, например, набивные уплотнения, что позволит дополнительно уменьшить величину утечек.

Совокупность существенных признаков может иметь развитие.

Установка может быть выполнена так, что устройство для регулирования парциальности может быть дополнительно снабжено заслонкой, размещенной на выходе по меньшей мере одной ступени лопаточной машины. Возможность регулирования степени расширения посредством изменения противодавления на выходе ступени лопаточной машины расширяет рабочий диапазон, в котором обеспечивается минимальный уровень утечек газа.

Кроме того, установка может содержать осушитель газа, размещенный между источником газа высокого давления и входом лопаточной машины. Наличие осушителя газа также позволяет расширить рабочий диапазон, в котором обеспечивается минимальный уровень утечек газа, так как позволяет изменять степень понижения давления без опасности выхода на критические температуры редуцируемого газа, при которых возможно обледенение проточной части лопаточной машины.

Далее изобретение подробно раскрывается со ссылкой на иллюстративные материалы, где:

на фиг. 1 приведена схема турбодетандера с парциальным сопловым устройством;

на фиг. 2 приведен график, отражающий зависимость снижения КПД ступени  $\Delta\eta$  вследствие наличия утечек в радиальном зазоре от степени реактивности ступени (по отношению к снижению КПД ступени с нулевой реактивностью  $\Delta\eta_0$ ).

На чертежах обозначены следующие элементы:

- 1 - турбина,
- 2 - парциальный сопловый аппарат,
- 3 - регулировочная заслонка,
- 4 - поворотный механизм регулировочной заслонки,
- 5 - регулируемый дроссель (заслонка),
- 6 - левая опора,
- 7 - левая стойка,
- 8 - правая опора,
- 9 - правая стойка.

Турбодетандерная энергетическая установка предназначена для одновременного получения механической энергии и хладоресурса. Установка содержит турбодетандер (фиг. 1), подключенный к источнику газа высокого давления на входе и потребителю газа низкого давления на выходе (на фиг. 1 не показаны). В качестве турбодетандера используется трехступенчатая лопаточная осевая машина (условно обозначенная на фиг. 1 как турбина 1) с устройством для регулирования парциальности в виде парциального соплового аппарата 2.

Каждая ступень лопаточной осевой машины (турбины 1) снабжена парциальным сопловым аппаратом 2, выполненным с возможностью регулирования степени парциальности каждой ступени. Рабочие колеса каждой ступени имеют нулевую или близкую к нулевой степенью реактивности, а профили, каждый по своему назначению, всех сопловых аппаратов и рабочих колес выполнены одинаковыми. При этом высота лопаток рабочего колеса первой ступени не превышает 0,02 м, а окружная скорость вращения рабочего вала не превышает 7 м/с. В качестве опор для рабочего вала использованы подшипники качения, а в качестве наружных уплотнений рабочего вала использованы уплотнения, исключающие протечки газа.

В приведенной на фиг. 1 схеме турбодетандера показан ротор турбины 1 барабанно-дискового типа, размещенный в двух опорах: левой опоре 6 и правой опоре 8 с подшипниками качения. Опоры 6 и 8 соединяются с внешним корпусом турбины через стойки: левую стойку 7 и правую стойку 9. Левая опора 6 ротора содержит роликовый подшипник, правая опора 8 ротора - шариковый упорный подшипник. Подшипники опор 6 и 8 выполнены с закладной (не циркуляционной) смазкой.

В полости между левой стойкой 7 и ротором турбины 1 установлен электродвигатель (не показан), закрепленный на левой опоре 6, с поворотным механизмом 4. Поворотный механизм 4 предназначен для обеспечения поворота и фиксации в окружном направлении регулировочной заслонки 3. Коммуникации для электропитания и управления электродвигателя поворотного механизма 4 проходят через левую стойку 7 турбины 1.

Все три сопловых аппарата турбины 1 выполнены парциальными. Межлопаточные каналы сопловых аппаратов могут быть выточены в цельной кольцевой заготовке. Регулировочная заслонка 3 предназначена для изменения степени парциальности турбины (сопловых аппаратов) путем перекрытия части каналов трех сопловых аппаратов при ее повороте на заданный угол и фиксации в данном положении. Степень парциальности сопловых аппаратов может меняться одновременно и одинаково для каждой ступени лопаточной машины турбодетандера. Возможен вариант регулирования, при котором степень парциальности по ступеням устанавливается различной.

Силовой элемент регулировочной заслонки 3, от которого отходят зубцы регулировочной заслонки (см. сечение А-А фиг. 1) для перекрытия части межлопаточных каналов сопловых аппаратов, расположен в промежуточном корпусе турбины, над сопловыми аппаратами.

Внутренняя полость, расположенная за турбиной 1, между ротором и правой стойкой 9, используется в качестве думисной/разгрузочной полости с целью поддержания остаточной величины осевой силы, действующей на правую опору 8, вблизи нулевого значения.

Регулирование осевой силы может осуществляться за счет отбора небольшого количества газа перед турбиной и его подвода в думисную полость через коммуникации, расположенные в правой стойке 9. Газ, используемый в думисной полости для разгрузки осевой силы, выбрасывается за турбину 1 через каналы, расположенные вблизи внешнего корпуса шарикового упорного подшипника, отводя тепло от правой опоры 8. Отвод тепла от внешнего корпуса роликового подшипника левой опоры 6 осуществляется газом, частично отведенным с входа турбины 1 через коммуникации, расположенные в левой стойке 7. Охладивший левую опору 6 газ выбрасывается в проточную часть турбины 1 через осевой зазор первой ступени (между сопловым аппаратом и рабочим колесом).

Газ, использованный для охлаждения опор 6 и 8, может быть использован также для подогрева газа на входе в турбину 1 путем его подмешивания. Также нагретый газ может быть направлен на обогрев регулируемого дросселя 5 (в случае необходимости).

Величина радиального зазора в 1% высоты лопатки приводит к снижению КПД ступени примерно на 1,5-2,0%. В рассматриваемой турбине величина снижения КПД, вследствие наличия радиального зазора, может составить примерно 4,0-5,0%.

Трехступенчатый турбодетандер обеспечивает оптимальную, с точки зрения величины утечек газа через радиальный зазор, степень понижения давления в каждой ступени.

Наличие парциального соплового аппарата 2 в составе каждой ступени обеспечивает формирование оптимальных параметров потока по скорости и характеру течения в каналах проточной части, позволяет уменьшить утечки через радиальный зазор и между ступенями лопаточной машины.

Выполнение рабочих колес каждой ступени с нулевой или близкой к нулевой степенью реактивности приводит к уменьшению перепада давлений между спинкой и корытом рабочих лопаточных венцов, что уменьшает перетекания газа через радиальный зазор.

Увеличение степени реактивности ступеней турбины приводит к увеличению влияния потерь от перетекания газа в радиальном зазоре на их КПД. На фиг. 2 приведена зависимость снижения КПД ступени  $\Delta\eta$  вследствие наличия потерь от перетекания газа в радиальном зазоре от степени реактивности (по отношению к снижению КПД ступени с нулевой реактивностью  $\Delta\eta_0$ ).

Выполнение рабочего колеса с высотой лопатки не более 0,02 м и обеспечение окружной скорости вращения рабочего вала не более 7 м/с позволяют сконструировать рабочее колесо, которое обеспечивает получение минимального радиального зазора, так как рабочие деформации в таком случае (удлинение лопатки, вибрационные перемещения и пр.) оказывают очень незначительное влияние на изменение радиального зазора.

Кроме того, ограничение окружной скорости вращения рабочего колеса позволяет использовать подшипники качения, что, в свою очередь, уменьшает радиальные перемещения вращающегося вала и позволяет оптимизировать величину радиального зазора. Низкая окружная скорость вращения вала, установленного в подшипники качения, дает возможность уменьшить зазоры между валом и корпусом и использовать, например, набивные уплотнения, что позволит дополнительно уменьшить величину утечек.

Нулевая степень реактивности ступеней также способствует уменьшению осевой силы, действующей на шариковый опорный подшипник турбины 1, практически, до нулевой величины.

Предложенная установка работает следующим образом.

Установка монтируется в линии байпаса/перепуска к газовым трубопроводам и отсекается входной и выходной задвижками от газовых трубопроводов (на фиг. 1 не показано).

Для запуска установки открывают вначале выходную задвижку, выравнивая давление в проточной

части турбины 1 и турбинных патрубках до входной задвижки. Затем приоткрывают входную задвижку, контролируя увеличение частоты вращения ротора турбины 1 и степени расширения в турбине.

При увеличении оборотов ротора турбина начинает отбирать тепловую мощность от газового потока, понижая его температуру и давление, преобразуя ее в механическую мощность на валу установки. Механическая мощность турбины передается через вал на вращение генератора с целью выработки электроэнергии.

Регулируемый дроссель (заслонка) 5, установленный на выходе из турбины 1, служит для изменения степени расширения в турбине (а также мощности турбины). Регулировка степени парциальности сопловых аппаратов при заданной степени расширения необходима для изменения расхода газа, проходящего через турбину в широком диапазоне его изменения.

Изменение степени расширения в турбине и степени парциальности сопловых аппаратов позволяет варьировать режим работы турбины (а также ее мощность) в широком диапазоне.

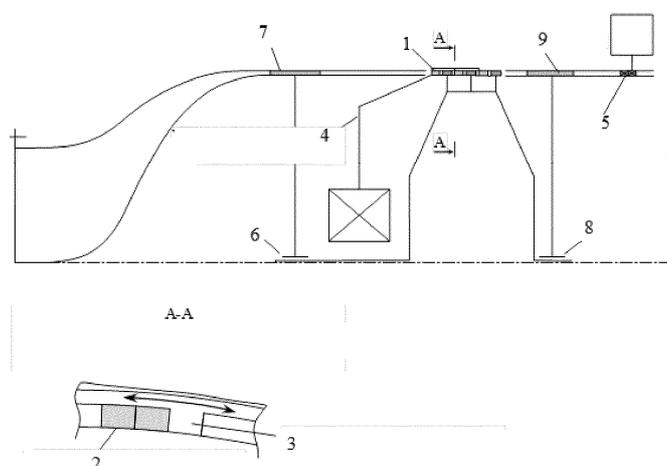
Представленные особенности выполнения проточной части турбодетандера позволяют максимально минимизировать в ней все виды потерь при течении газа с получением приемлемого значения КПД, в том числе при изменении степени парциальности при необходимости поддержания стабильной мощности энергосистемы. Выбранный уровень числа оборотов позволяет при мощности турбодетандера менее 4,5 МВт достичь окружной скорости вала ниже 5 м/с, что оправдывает использование консистентной смазки и набивной или сальниковой системы уплотнения вала с применением современных полимерных материалов, полностью исключая утечки газа в атмосферу с повышением тем самым эффективности системы. Низкая частота вращения также обеспечивает снижение величины утечек, так как это позволяет уменьшить радиальные зазоры в проточной части за счет фактического устранения вытягивания рабочих лопаток (уменьшения колебаний размеров лопаток), установить вал в подшипники качения и за счет этого уменьшить колебания вала в опорах, соответственно уменьшить зазоры в проточной части, уменьшить зазоры в уплотнениях вала.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

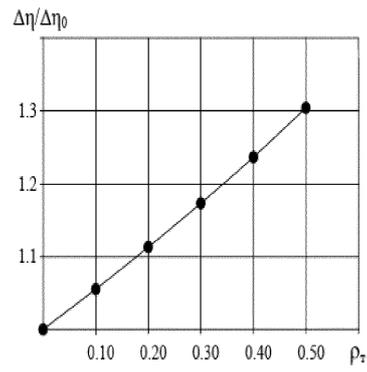
1. Турбодетандерная энергетическая установка, предназначенная для одновременного получения механической энергии и хладоресурса, содержащая турбодетандер, подключенный к источнику газа высокого давления на входе и потребителю газа низкого давления на выходе, где турбодетандер выполнен в виде лопаточной осевой машины с устройством для регулирования парциальности в виде парциального соплового аппарата, отличающаяся тем, что лопаточная осевая машина выполнена трехступенчатой, каждая ступень которой снабжена парциальным сопловым аппаратом, выполненным с возможностью регулирования степени парциальности каждой ступени, рабочие колеса каждой ступени имеют нулевую или близкую к нулевой степень реактивности, высота лопаток рабочего колеса первой ступени не превышает 0,02 м, а окружная скорость вращения рабочего вала не превышает 7 м/с, причем в качестве опор для рабочего вала использованы подшипники качения.

2. Установка по п.1, отличающаяся тем, что устройство для регулирования парциальности дополнительно снабжено заслонкой, размещенной на выходе по меньшей мере одной ступени лопаточной машины.

3. Установка по п.1, отличающаяся тем, что содержит осушитель газа, размещенный между источником газа высокого давления и входом лопаточной машины.



Фиг. 1



Фиг. 2