

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **035797**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

- |   |  |
|---|--|
| <p>(45) Дата публикации и выдачи патента<br/><b>2020.08.12</b></p> <p>(21) Номер заявки<br/><b>201890680</b></p> <p>(22) Дата подачи заявки<br/><b>2015.09.18</b></p> | <p>(51) Int. Cl. <b>F01D 1/14</b> (2006.01)<br/><b>F01D 9/06</b> (2006.01)<br/><b>F01D 17/08</b> (2006.01)<br/><b>F01D 17/14</b> (2006.01)</p> |
|---|--|

---

**(54) СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ГАЗООБРАЗНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА И  
УСТАНОВКА ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**


---

- |   |  |
|---|--|
| <p>(43) <b>2018.08.31</b></p> <p>(86) <b>PCT/RU2015/000588</b></p> <p>(87) <b>WO 2017/048149 2017.03.23</b></p> | <p>(56) BY-C1-10032<br/>US-A-791949<br/>RU-C2-2543586<br/>US-A-1603081</p> |
|---|--|

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"ТУРБОЭНЕРДЖИ" (RU)**

(72) Изобретатель:  
**Левков Кирилл Леонидович,  
Левков Леонид Федорович, Новиков  
Александр Леонидович (BY)**

(74) Представитель:  
**Котлов Д.В., Черняев М.А.,  
Пустовалова М.Л., Равлина Е.А.,  
Яремчук А.А. (RU)**

- (57) Заявлено устройство преобразования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, содержащее корпус (1, 2), установленные в корпусе потребитель вырабатываемой механической энергии (10) и расширительную турбину (16), образованную корпусом (14) и расположенным в нем рабочим колесом (3) с лопатками, газовой (5), патрубками для подвода (8) и отвода (9) теплоносителя, патрубки подвода (6) газообразного рабочего тела к рабочему колесу (3) расширительной турбины (16) и патрубки отвода (7) газообразного рабочего тела, при этом рабочее колесо установлено на валу, соединенным с валом потребителя (10) вырабатываемой механической энергии. Корпус (14) расширительной турбины (16) снабжен сопловыми каналами (4) и обратными направляющими каналами (15). Сопловые каналы (4) и обратные направляющие каналы (15) расположены по окружности рабочего колеса (3) с угловыми смещениями по направлению вращения рабочего колеса (3) и соединены между собой газоводами (5) так, что вход каждого газовода (5) соединен с обратным направляющим каналом (15), а выход газовода (5) соединен с сопловым каналом (4). Способ использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, осуществляемый в устройстве по пп.1-4, включающий многократное расширение при одновременном понижении его давления, температуры и отвод вырабатываемой механической энергии, нагрев или охлаждение теплообменником в теплоносителе после каждого расширения. Осуществляют многоступенчатое последовательное расширение со скоростью потока газообразного рабочего тела на выходе из сопловых каналов каждой ступени в пределах чисел Маха 0,3-0,5 и отношении  $U/C_{зд}=0,5$  на каждой ступени расширения и с равными степенями понижения давления и сбрасываемого теплоперепада на всех ступенях расширения газообразного рабочего тела.

**035797**  
**B1**

**035797**  
**B1**

### Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к области энергетики, в частности к устройствам и способам утилизации энергии избыточного давления газообразного рабочего тела в турбогенераторе, а именно преобразования энергии избыточного давления газообразного рабочего тела в механическую/электрическую энергию.

#### Предшествующий уровень техники

Из уровня техники известны турбогенераторные установки большой мощности: 1-10 МВт (турбогаз <http://www.turbogaz.com.ua/equipment/turbodetandr/utdu.html>, Криокоп [http://www.cryocor.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=23&Itemid=67](http://www.cryocor.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=67), Atlas Copco <http://www.atlascopco-gap.com/products/expanders/>, CryoStar <http://www.cryostar.com/web/turboexpanders.php>, GE [http://site.ge-energy.com/businesses/ge\\_oilandgas/en/literature/en/downloads/turbo\\_generators.pdf](http://site.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/literature/en/downloads/turbo_generators.pdf)), которые способны работать только при больших перепадах давления и расходах газообразного рабочего тела. Это существенно ограничивает область их применения, особенно при использовании для утилизации вторичных (побочных) энергоресурсов в промышленности, газотранспортной системе, жилищно-коммунальном хозяйстве и т.д. Например такие установки можно использовать только в системах газообеспечения крупных объектов с непрерывным большим, на уровне 100 тысяч - 1 миллиона кубометров, часовым потреблением газа. Существует ограниченное число таких объектов: крупные города, крупные тепловые электрические станции, большие заводы.

Для расширения круга объектов, допускающих утилизацию энергии избыточного давления газообразного рабочего тела, необходимы установки малой мощности, способные работать при малых расходах и перепадах давления. В частности, установки предназначенные для работы на газораспределительных станциях (ГРС) и газорегуляторных пунктах и установках (ГРП и ГРУ) с небольшими расходами газа. Такие установки представлены всего несколькими фирмами в США, Германии, Чехии, России и Украине.

Тренды в области установок малой мощности различаются в зависимости от страны. Так, в США и Германии разрабатываются и производятся высокооборотные одноступенчатые радиально-осевые турбинные установки (до 100000 об/мин) с применением газодинамических или электродинамических подшипников и высокочастотных генераторов (компания RMG и др.). В России и Украине используются в основном одноступенчатые осевые низкооборотные турбины (до 3000 об/мин) в сочетании с промышленными электрогенераторами. Однако разработаны также установки для утилизации энергии избыточного давления природного газа с большим числом оборотов (микротурбинные технологии <http://stc-mt.ru/mikroturbodetandernyj-generator-elektricheskoy-moshhnostyu-20-kvt-mdg-20>, Турбохолд <http://www.turbokholod.ru/content/cio-page1.html>).

Альтернативными вариантами преобразования энергии избыточного давления газообразного рабочего тела в электроэнергию служат струйные (ООО "Укрнефтезапчасть" [http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/88\\_tda-SRT.pdf](http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/88_tda-SRT.pdf)), винтовые машины (Langson <http://www.langsonenergy.com/products/turbo-expanders-gas>) и установки других типов.

Однако, по-прежнему, вопросы подогрева газа решаются за счет сжигания части газа или за счет другого высокотемпературного источника. Не решены также проблемы стабильного регулирования изменения давления и расхода природного газа, надежности и долговечности установок.

Из уровня техники известна детандер-генераторная установка (см. источник информации <http://www.turbogaz.com.ua/eng/equipment/turbodetandr/dgu.html>). В указанной установке отсутствует подогреватель природного газа, в результате чего подогрев не осуществляется, или используется внешний подогреватель с высокотемпературным теплоносителем, для чего требуется сжигание газа. Реализована одноступенчатая схема, которая не позволяет осуществлять регулирование при изменении давления и расхода газа. Так как располагаемый теплоперепад срабатывается на одной ступени, то установка способна работать в узком диапазоне нагрузок. К достоинствам можно отнести простоту конструкции, к недостаткам - низкую эффективность (30%) и ограниченное количество объектов, на которых эта установка может применяться. Известно о нескольких объектах, на которых работали данные машины. Однако ДГУ-8 рассчитана на большие начальные давления газа, т.е. применима для ГРС. Такие станции обладают существенно большим потенциалом, чем 8 кВт, которые может сгенерировать данная установка.

Из уровня техники также известна установка фирмы Gascontrol <http://www.gascontrol.cz/en/produkty/expanzni-turbina.html>. В известной установке также отсутствует подогрев природного газа, следовательно, подогрев не осуществляется, или используется внешний подогреватель с высокотемпературным теплоносителем (требуется сжигание газа). Указанная установка реализована по одноступенчатой схеме, которая не позволяет осуществлять регулирование при изменении давления и расхода газа. Так как располагаемый теплоперепад срабатывается на одной ступени, то установка способна работать исключительно в узком диапазоне нагрузок. Небольшая выходная мощность не только ограничивает область применения, но и увеличивает срок окупаемости данной установки. Работа в узком диапазоне мощностей ограничивает количество допустимых объектов для внедрения. Применение известной установки возможно только на ГРС, что заметно снижает число потенциальных мест ис-

пользования.

Также известна из уровня техники микротурбодетандерная установка МДГ-20 (см. источник информации <http://stc-mtt.ru/mikroturbodetandernyj-generator-elektricheskoy-moshhnostyu-20-kvt-mdg-20>). В указанной установке отсутствует подогреватель природного газа, следовательно, подогрев не осуществляется, или используется внешний подогреватель с высокотемпературным теплоносителем (требующий сжигание газа). Установка разрабатывалась с целью обеспечить собственные нужды ГРС электроэнергией. Реализована простейшая одноступенчатая схема. Регулирование осуществляется за счет изменения частоты вращения ротора. Применены высокооборотный электрогенератор и газовые подшипники. Данное решение усложняет и удорожает конструкцию. Число объектов, которые обуславливает эта установка, ограничено ввиду необходимости высокого входного давления и постоянного расхода газа. Производитель ориентируется на создание машин только для ГРС, поэтому используется всего около 10% возможных площадок для установки турбодетандеров. Узкая направленность самой установки (применима только для собственного обеспечения ГРС электроэнергией) ограничивает диапазон ее использования, хотя такие станции обладают существенно большим энергетическим потенциалом. Близкая ситуация с установками другой российской компании Турбохолд (см. выше).

Также из уровня техники известен турбодетандерный агрегат ТДА-СРТ-55 (см. <http://ukrnz.com.ua/>). В известном агрегате используется внешний подогреватель рабочего газа с высокотемпературным теплоносителем (требуется сжигание газа). Реализована одноступенчатая схема с применением струйно-реактивной турбины, которая не позволяет осуществлять регулирование при изменении давления и расхода газа. Упрощением конструкции является применение струйной, а не лопаточной машины. Это удешевляет установку, однако сказывается на ее энергетической эффективности.

Из уровня техники также известен турбодетандер MTG 160 (см. источник информации [https://www.honevwellprocess.com/library/marketing/tech-specs/MTG\\_rus\\_0702.pdf](https://www.honevwellprocess.com/library/marketing/tech-specs/MTG_rus_0702.pdf)), у него отсутствует подогреватель природного газа, следовательно, подогрев не осуществляется, или используется внешний подогреватель с высокотемпературным теплоносителем (требуется сжигание газа). Реализована одноступенчатая схема с применением высокооборотного радиального колеса. Регулирование осуществляется за счет изменения частоты вращения ротора. Применен высокооборотный электрогенератор.

Из уровня техники известен агрегат для использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела и способ использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела (см. патент ВУ 10032 С1, F17D 1/00, опубл. 30.12.2007). Агрегат для использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела содержит

расширительную турбомашину, содержащую кожух с расположенным в нем рабочим колесом с лопатками, установленным на валу, который связан с валом отбора механической энергии;

патрубки подвода газообразного рабочего тела с блоками сопел для подвода газообразного рабочего тела к лопаткам рабочего колеса и патрубками отвода газообразного рабочего тела;

корпус, содержащий расширительную турбомашину, снабженный патрубками подвода и отвода теплоносителя;

спиральные каналы, образующие теплообменники, расположенные между корпусом и кожухом, каждые полвитка, которых размещены по обеим сторонам рабочего колеса, при этом один их конец снабжен блоком сопел.

Недостатками известного агрегата является большое гидравлическое сопротивление каналов газового тракта, вследствие чего снижается перепад давления для совершения полезной работы в виде механической (электрической) энергии. Присутствует также не оптимальность выходного профиля рабочих лопаток, вследствие требований к их симметричности. Имеются потери на выколачивание потока в ступенях турбины из-за изменения направления течения потока.

Из указанного выше патента ВУ 10032 С1 известен также способ использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, в котором неоднократно расширяют газообразное рабочее тело при одновременном понижении его давления, температуры и отводят вырабатываемую при этом механическую энергию, при этом после каждого расширения газообразного рабочего тела осуществляется его принудительный нагрев или охлаждение теплоносителем в теплообменнике, расположенном непосредственно внутри корпуса агрегата.

Недостатками известного способа является сложность создания достаточной теплопередающей поверхности с сохранением минимальных гидравлических потерь для потока газообразного рабочего тела, а также обеспечение оптимального отношения  $U/C_{ад}$  на всех ступенях расширения газообразного тела.

### **Сущность изобретения**

Технической задачей, решаемой заявленным изобретением, является создание технологии и устройства, позволяющего эффективно, экономично и надежно утилизировать энергию избыточного давления газообразного рабочего тела, а именно преобразовать энергию избыточного давления газообразного рабочего тела в механическую/электрическую энергию.

Технический результат заявленного изобретения заключается в повышении КПД и надежности заявленного устройства, в повышении эффективности технологии использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, редуцирования давления газообразного рабочего тела до нескольких

потребительских уровней.

Технический результат заявленного изобретения достигается за счет того, что устройство преобразования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, содержащее, корпус, установленные в нем потребители вырабатываемой механической энергии и расширительную турбину с рабочим колесом с лопатками, корпус которой включает сопловые каналы и обратные направляющие каналы, газопроводы, патрубки для подвода и отвода теплоносителя, патрубки подвода газообразного рабочего тела к рабочему колесу и патрубки отвода газообразного рабочего тела, а рабочее колесо установлено на валу, соединенным с валом потребителя вырабатываемой механической энергии,

причем обратные направляющие каналы расположены по окружности рабочего колеса с угловыми смещениями по направлению вращения рабочего колеса и соединены между собой газопроводами с возможностью образования последовательных ступеней расширения газообразного рабочего тела, причем вход каждого газопровода соединен с обратным направляющим каналом, а выход газопровода соединен с сопловым каналом, при этом газопроводы выполнены в виде изогнутых труб и расположены внутри корпуса устройства с образованием теплообменника.

В частном случае реализации заявленного изобретения газопроводы дополнительно снабжены интенсификаторами теплообмена, в виде оребрения, позволяющего увеличить площадь теплопередающей поверхности и турбулизировать потоки теплоносителей.

В частном случае реализации заявленного изобретения расширительная турбина выполнена в виде одного рабочего колеса радиального типа.

В частном случае реализации заявленного изобретения на входе сопловых каналов по давлению на выходе из последней ступени расширения сопловых каналов выполнено регулировочное устройство.

Технический результат заявленного изобретения достигается за счет того, что используют энергию перепада давления газообразного рабочего тела в устройстве преобразования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, содержащим корпус, установленные в нем потребители вырабатываемой механической энергии и расширительную турбину с рабочим колесом с лопатками, корпус которой включает сопловые каналы и обратные направляющие каналы, газопроводы, патрубки для подвода и отвода теплоносителя, патрубки подвода газообразного рабочего тела к рабочему колесу и патрубки отвода газообразного рабочего тела, а рабочее колесо установлено на валу, соединенным с валом потребителя вырабатываемой механической энергии, причем обратные направляющие каналы расположены по окружности рабочего колеса с угловыми смещениями по направлению вращения рабочего колеса и соединены между собой газопроводами с возможностью образования последовательных ступеней расширения газообразного рабочего тела, причем вход каждого газопровода соединен с обратным направляющим каналом, а выход газопровода соединен с сопловым каналом, при этом газопроводы выполнены в виде изогнутых труб и расположены внутри корпуса устройства с образованием теплообменника, включая многократное расширение газообразного рабочего тела и отвод вырабатываемой механической энергии, нагрев или охлаждение теплообменником в теплоносителе рабочего тела после каждого расширения, причем многократное расширение рабочего тела производят последовательно на одном рабочем колесе, со скоростью потока газообразного рабочего тела на выходе из сопловых каналов каждой ступени в пределах чисел Маха 0,3-0,5 и оптимальном отношении  $U/C_{ад} = 0,5$  в каждой ступени расширения с равными степенями понижения давления синхронно с теплоперепадом на каждой ступени расширения газообразного рабочего тела.

#### Краткое описание чертежей

Детали, признаки, а также преимущества технических решений следуют из нижеследующего описания вариантов реализации заявленного способа и устройства с использованием чертежей, на которых показано

фиг. 1 - процессы расширения идеального газа (1-2а, 1-2 и 1-а-б-в-г-д-2 - соответственно адиабатный, изотермический, многоступенчатый процессы);

фиг. 2 - i-s-диаграмма метана (I - одноступенчатое расширение с последующим подогревом, II - одноступенчатый подогрев с расширением, III - многоступенчатое расширение с промежуточным подогревом между ступенями);

фиг. 3 - принципиальная схема конструкции установки;

фиг. 4 - принципиальное расположение газопроводов.

На чертежах позициями обозначены следующие элементы:

1 - первая часть разъемного наружного корпуса; 2 - вторая часть разъемного наружного корпуса; 3 - рабочее колесо; 4 - сопловые каналы и обратные направляющие каналы; 5 - газопроводы; 6 - патрубок подвода газообразного рабочего тела; 7 - патрубок отвода газообразного рабочего тела; 8 - патрубок подвода теплоносителя; 9 - патрубок отвода теплоносителя; 10 - электрогенератор; 11 - вывод электрокабеля; 12 - интенсификаторы теплообмена; 13 - регулировочное устройство; 14 - корпус расширительной турбины.

#### Раскрытие изобретения

Заявленное устройство состоит из турбины для расширения газообразного рабочего тела, теплообменника для подвода тепловой энергии газообразному рабочему телу, электрогенератора для преобразования механической энергии вращения рабочего колеса турбины в электрическую. Указанные конструк-

тивные элементы заявленного устройства объединены в единую конструкцию герметичным корпусом. Использование заявленного устройства позволяет эффективно использовать низкопотенциальные побочные энергоресурсы для выработки электроэнергии без потребления топлива.

Более детально заявленная установка (фиг. 3) состоит из наружного корпуса, выполненного разъемным и состоящим из двух частей (1, 2), турбинной части, состоящей из корпуса расширительной турбины (14) и расположенным в нем одним радиальным рабочим колесом (3) с рабочими лопатками, сопловыми каналами и обратными направляющими каналами (4), расположенными по окружности рабочего колеса (3) с угловыми смещениями по направлению вращения рабочего колеса и соединенные между собой газовадами (5), образующими теплообменную поверхность (теплообменник), электрогенератора (10), расположенного внутри корпуса установки. Корпус установки снабжен патрубком подвода (6) и патрубком отвода (7) газообразного рабочего тела, а также патрубком подвода (8) и патрубком отвода (9) теплоносителя.

Газоводы (5) образованы рядами изогнутых труб, расположенных внутри части корпуса и образующих с ней теплообменник (фиг. 4).

Газоводы (5) могут быть дополнительно снабжены интенсификаторами теплообмена (12), выполненными в виде оребрения и позволяющими увеличивать эффективность теплообмена.

Причем газоводы (5) в совокупности с сопловыми каналами и обратными направляющими каналами (4) образуют ступени расширения газообразного рабочего тела. Сопловые каналы установлены на выходе из каждого газовода (5), а вход каждого газовода (5) выполнен с обратного направляющего канала.

Сопловые каналы и обратные направляющие каналов (4) газоводов (5) расположены по окружности рабочего колеса (3). Таким образом, происходит многоступенчатое расширение газообразного рабочего тела на одном рабочем колесе (3) в ходе его последовательного перемещения с одного сектора рабочего колеса (3) к другому.

Количество упомянутых ступеней расширения газообразного рабочего тела может быть доведено до тридцати.

Рабочее колесо (3) напрямую соединено с ротором электрогенератора (10) посредством установки рабочего колеса (3) на валу электрогенератора (10).

Электрогенератор (10) располагается внутри установки.

Части (1, 2) корпуса установки соединены герметично, что особенно важно при работе с взрывопожароопасными газами. Через корпус устраивается герметичный взрывозащищенный вывод электрокабелей (11) от электрогенератора (10).

На входе сопловых каналов установлено регулировочное устройство (13) которое обеспечивает стабилизацию и поддержание выходного давления газообразного рабочего тела на требуемом уровне, при изменении расхода газообразного рабочего тела, регулировка происходит по давлению на выходе из последней ступени расширения.

Снижение потерь в установке на переток газообразного рабочего тела из зон высокого в зоны низкого давления, а именно от одной ступени расширения газообразного рабочего тела к последующей, производится путем устройства лабиринтных уплотнений. Лабиринтные уплотнения выполнены в виде концентрических гребешков, расположенных на ступице рабочего колеса (3) и внутреннем корпусе установки (14).

Поток газообразного рабочего тела поступает в установку через патрубок (6) и регулировочное устройство (13), проходит сопловые каналы (4) первой ступени расширения газообразного рабочего тела и лопатки рабочего колеса (3), поступает в газовод (5) и по ним - к сопловому каналу (4) второй ступени. Пройдя сопловой канал (4) второй ступени указанный поток по газоводу (5) вновь поступает на лопатки рабочего колеса (3) третьей ступени и так далее, двигаясь последовательно по газоводам через несколько ступеней, с требуемым конечным давлением покидает турбоагрегат через патрубок (7).

Происходит многоступенчатое снижение давления потока газообразного рабочего тела на лопатках одного рабочего колеса (3), которое осуществляется за счет его парциального подвода.

В установке подвод тепловой энергии к газообразному рабочему телу происходит между ступенями расширения. Газ движется внутри газоводов (5), а теплоноситель из патрубка (8) поступает в часть (2) корпуса, омывая упомянутые газоводы (5), и подогревает газообразное рабочее тело. Охлажденный теплоноситель отводится через патрубок (9).

После последней ступени расширения газообразное рабочее тело, посредством каналов, выполненных во внутреннем корпусе (14), поступает в полость части (1) корпуса установки и дополнительно подогревается за счет отвода тепловой энергии от корпуса электрогенератора (10). Осуществляется передача большей части тепловой энергии от электрогенератора (10) газообразному рабочему телу с целью охлаждения электрогенератора (10) и повышения температуры газообразного рабочего тела. При многократном подогреве газа между ступенями расширения практически реализуется термодинамический процесс расширения газа при постоянной температуре (фиг. 2). Согласно теории термодинамики при изотермическом процессе вся теплота, переданная теплоносителем газообразному рабочему телу, расходуется на совершение внешней механической работы.

При этом достигается эффективное использование потока газообразного рабочего тела под избыточным давлением и низкопотенциального теплого потока для подогрева.

Многоступенчатый парциальный подвод газообразного рабочего тела с его промежуточным подогревом низкопотенциальным тепловым потоком на одно низкооборотное рабочее колесо, сопряженное с ротором электрогенератора, расположенного внутри корпуса установки, позволяет эффективно утилизировать низкопотенциальные потоки газообразного рабочего тела (с малым расходом и перепадом давления), обеспечивая

сокращение перетоков рабочего тела вследствие обеспечения отношения  $h/b$  не менее 1, что положительно сказывается на лопаточном КПД установки и высоте рабочих лопаток;

низкие скорости потока рабочего тела (число Маха 0,3-0,5) и низкая частота вращения рабочего колеса (до 3500 об/мин), позволяющие увеличить надежность и простоту установки путем применения общепромышленных электрогенераторов и подшипниковых узлов, сохраняя при этом оптимальное отношение  $U/C_{ад}=0,5$  и возможность обеспечения требуемого подогрева между ступенями (на 1 кВт вырабатываемой электроэнергии подводится 1 кВт тепловой);

размещением установки в одном корпусе обеспечивает эффективное охлаждение электрогенератора с использованием избытка тепловой энергии (10-20% от электрической мощности генератора) для подогрева рабочего тела, существенно упрощая отбор энергии от установки внешнему потребителю и увеличивая надежность работы электрогенератора.

Заявленный способ преобразования энергии газообразного рабочего тела, включающий многократное расширение при одновременном понижении его давления, температуры и отвод вырабатываемой механической энергии, многократный нагрев или охлаждение теплоносителем в теплообменнике после каждого расширения, отличающийся тем, что многоступенчатое последовательное расширение осуществляют со скоростью потока газообразного рабочего тела на выходе из сопловых каналов каждой ступени в пределах чисел Маха 0,3-0,5 и оптимальном отношении  $U/C_{ад}=0,5$  на каждой ступени расширения.

Снижение давления происходит с равными степенями понижения давления и срабатываемого теплотерпада на всех ступенях расширения газообразного рабочего тела.

При изменении расхода газообразного рабочего тела стабилизация и поддержание выходного давления газообразного рабочего тела на требуемом уровне происходит в регулировочном устройстве на входе сопловых каналов по давлению на выходе из последней ступени расширения.

Многократное расширение газообразного рабочего тела, осуществление принудительного нагрева или охлаждения теплоносителем в теплообменнике, расположенным непосредственно внутри корпуса агрегата, и отвод механической энергии, при этом многократно (многоступенчато) расширяют газообразное рабочее тело в пределах одного рабочего колеса, при условии сохранения оптимального отношения окружной скорости рабочего колеса к располагаемому теплотерпаду ( $U/C_{ад}$ ) на каждом этапе расширения, с одновременным многократным (многоступенчатым) подогревом (охлаждением) газообразного рабочего тела.

Производится многократное расширение в пределах одного рабочего колеса (3) путем подвода рабочего тела через сопловые каналы (4), расположенные по окружности рабочего колеса (3), с одновременным межступенчатым подогревом рабочего тела в каналах, соединяющих выход предыдущей с каналом последующей ступени расширения.

Подвод тепловой энергии рабочему телу осуществляется от низкопотенциального внешнего теплоносителя до расширения на рабочем колесе и/или перед каждой ступенью расширения, а также путем отвода тепловой энергии от электрогенератора и передачи ее газообразному рабочему телу.

Возможна реализация процесса внутренней рекуперации путем передачи тепловой энергии газообразного рабочего тела, движущегося по газовым каналам, к тому же газообразному рабочему телу, находящемуся в межканальном пространстве. Таким образом, возможно осуществить еще большее охлаждение расширенного газообразного рабочего тела самим холодным газообразным рабочим телом.

Термодинамический процесс расширения газообразного рабочего тела с одновременным его подогревом перед каждой ступенью расширения приближается к изотермическому процессу.

Термодинамический процесс расширения рабочего тела с одновременным его охлаждением после каждой ступени расширения приближается к изэнтропическому (идеальному адиабатическому процессу).

В качестве рабочего тела возможно использование любых газов, находящихся под избыточным давлением (природный газ, водяной пар и др.), а в качестве теплоносителя любых тепловых отходов (горячая вода или водяной пар и конденсат с производств, дымовые газы, горячий воздух, выхлопные газы транспортных средств, теплота, выделяемая электротрансформаторами и любыми другими устройствами, и т.д.). При этом энергетическая установка включается в состав установки, работающей по замкнутому энергетическому циклу, в частности по циклу Ренкина (рабочее тело с низкой температурой кипения: бутан, пентан и т.д.) или по циклу Брайтона (рабочее тело: дымовые газы, воздух и т.д.).

Снижение давления происходит с равными степенями понижения давления и срабатываемого теплотерпада на всех ступенях расширения газообразного рабочего тела.

При изменении расхода газообразного рабочего тела стабилизация и поддержание выходного дав-

ления газообразного рабочего тела на требуемом уровне происходит в регулировочном устройстве на входе сопловых каналов по давлению на выходе из последней ступени расширения.

В результате преобразования энергии сжатого газа в работу в ходе адиабатного расширения происходит снижение температуры газа порядка  $10^{\circ}\text{C}$  на шаг ступени снижения давления в  $0,1$  МПа. Например, при низкой температуре некоторые компоненты, составляющие смесь "природный газ", изменяют свое содержание в потоке газа, а избыточное количество в ином агрегатном состоянии выделяется в поток. При охлаждении ниже температуры точки росы избыточная влага выделяется в жидкой или твердой фазах. Тяжелые углеводороды, например пропан-бутановые фракции, в соответствии с изотермой равновесия частично переходят в жидкое состояние. В результате образуется смесь подобие снежной массы, которая негативно воздействует на проточную часть турбины, с одной стороны, увеличивает необратимые потери, изменяя геометрические характеристики направляющего аппарата, с другой - снижает надежность работы установки из-за возможности ускоренного разрушения рабочих лопаток. Кроме того, по нормам природный газ должен поступать потребителю с температурой не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . Поэтому его необходимо подогревать до или после турбогенератора, о чем говорилось выше. В существующих утилизационных турбогенераторах газ либо не подогревается, что связано с небольшим теплоперепадом, сбрасываемом в них, либо подогревается водой с температурой  $70-130^{\circ}\text{C}$ . Нагрев природного газа, в свою очередь, зависит от сбрасываемого теплоперепада и начальной температуры потока газа. В последнем случае могут возникнуть проблемы с обеспечением установки требуемым теплоносителем.

На фиг. 1 представлены различные процессы расширения в  $p-v$ -диаграмме, где техническая работа изображается заштрихованной площадью. Очевидно, что при многоступенчатом расширении имеет место приближение к изотермическому варианту протекания, характеризующемуся наибольшей работой процесса, а степень приближения зависит от числа ступеней.

Теплоперепад, сбрасываемый на каждой ступени, снижается пропорционально числу ступеней расширения и, соответственно, уменьшается теплота процесса подогрева потока перед следующей ступенью расширения (фиг. 2). В конечном итоге, в пределе возможно в качестве греющего теплоносителя использование оборотной воды систем охлаждения и других потоков, утилизация которых представляет интерес, но затруднена в связи с низким температурным потенциалом.

В условиях низкой стоимости энергоносителей применяются дешевые и надежные машины-регуляторы давления на базе процесса дросселирования с соответствующими потерями эксергии. Принято с достаточной точностью считать, что энтальпия начальной и конечной точек процесса дросселирования одинакова, однако ход необратимого процесса не известен, и изображается он на  $i-s$ -диаграмме пунктиром  $i=\text{const}$ .

Работа адиабатного процесса на  $i-s$ -диаграмме изображается отрезком на оси ординат, а в случае многоступенчатого расширения потока, состоящего из совокупности адиабатных и изобарных процессов, определяется суммой сбрасываемых теплоперепадов всех ступеней.

Вариант № I реализации той же совокупности процессов допускает использование теплоносителей с относительно невысокими температурами, но характеризуется меньшей работой.

Вариант № II реализации указанной совокупности процессов расширения характеризуется наибольшей работой, что связано с увеличением начальной температуры, однако для его реализации необходим высокопотенциальный теплоноситель.

Для решения задачи устранения недостатков обоих вариантов целесообразно рассмотреть возможность применения многоступенчатого расширения потока газа с промежуточным подводом теплоты после каждой ступени (вариант № III), что приближает процесс к изотермическому и, как известно, увеличивает отводимую работу. При этом тепловой перепад, сбрасываемый на каждой ступени, и теплота процесса возврата температуры потока газа к начальному значению после расширения в каждой ступени снижаются пропорционально числу ступеней расширения, в связи с чем оказывается возможным использование для нагрева рабочего тела низкотемпературного теплоносителя, например использование оборотной воды и пр.

Газообразное рабочее тело поступает в установку через подводящий газопровод, проходит сопла первой ступени и лопатки колеса, поступает в газовые каналы и по ним направляется к соплам второй ступени. Пройдя сопла второй ступени, по газовым каналам оно вновь через сопла поступает на лопатки колеса третьей ступени и далее, двигаясь последовательно по каналам через несколько ступеней с требуемым конечным давлением покидает турбоагрегат через отводящий газопровод.

Происходит многоступенчатое снижение давления газообразного рабочего тела на рабочих лопатках одного рабочего колеса, которое осуществляется за счет парциального многократного возврата газообразного рабочего тела газа на рабочее колесо. Число ступеней расширения может быть доведено до тридцати.

В заявленной установке подвод тепловой энергии к газообразному рабочему телу осуществляется до расширения и/или перед каждой ступенью расширения.

Газообразное рабочее тело движется внутри каналов, а жидкий или газообразный теплоноситель из трубопроводов поступает в межканальное пространство и, омывая каналы снаружи, осуществляет теплообмен с газообразным рабочим телом, после этого теплоноситель отводится через трубопроводы из заяв-

ленной установки. Установка отличается от известных турбогенераторов тем, что в одном агрегате совмещаются турбина, теплообменник и электрогенератор. Многоступенчатое расширение потока происходит на одном рабочем колесе в ходе его последовательного перемещения с одного сектора колеса к другому.

Нагрев потока происходит многократно, в соответствии с числом ступеней расширения, во время его движения от одного сектора рабочего колеса к другому. Каналы образованы рядами изогнутых труб соответствующего диаметра, греющий теплоноситель движется в межтрубном пространстве.

В установке может быть использован любой газ, находящийся как в идеально-газовой, так и в паровой областях. Греющий теплоноситель - любой низкотемпературный теплоноситель. Давления и температуры обоих утилизируемых потоков могут быть различными.

Заявленная установка регулируется при изменении расходов и параметров входящего и выходящего потоков природного газа.

Подогрев природного газа осуществляется низкотемпературным (до 30°C) теплоносителем (водой, тепловыми отходами и т.д.) во встроенном теплообменнике. Подогрев осуществляется поэтапно после каждой ступени расширения. Это снижает требования к температурному потенциалу греющего теплоносителя. Данное свойство также является новаторским решением.

Установка работает без потребления топлива, в результате ее использования не происходит сжигания топлива для подогрева газа. Используется лишь часть уже затраченной энергии (вторичной). Следовательно, установка является экологически чистой.

Установка является тихоходным агрегатом в отличие от существующих турбогенераторов малой мощности. Это позволяет упростить конструкцию, снизить стоимость и повысить срок ее службы.

Компактные размеры и универсальность установки (не требуется применения дополнительного оборудования) позволяют размещать ее в зданиях ГПС и ГРП или пристройке к ним с минимальным количеством дополнительной арматуры.

При работе с взрыво- и пожароопасным газом необходимо обеспечивать высокий класс герметичности, который достигается за счет капсульного размещения электрогенератора.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство преобразования внутренней энергии газообразного рабочего тела в механическую или электрическую энергию в турбогенераторе, содержащее корпус, установленные в нем потребитель вырабатываемой механической энергии и расширительную турбину с рабочим колесом с лопатками, корпус которой включает сопловые каналы и обратные направляющие каналы, газопроводы, патрубки для подвода и отвода теплоносителя, патрубки подвода газообразного рабочего тела к рабочему колесу и патрубки отвода газообразного рабочего тела, а рабочее колесо установлено на валу, соединенным с валом потребителя вырабатываемой механической энергии,

отличающееся тем, что обратные направляющие каналы расположены по окружности рабочего колеса с угловыми смещениями по направлению вращения рабочего колеса и соединены между собой газопроводами с возможностью образования последовательных ступеней расширения газообразного рабочего тела, причем вход каждого газопровода соединен с обратным направляющим каналом, а выход газопровода соединен с сопловым каналом, при этом газопроводы выполнены в виде изогнутых труб и расположены внутри корпуса устройства вместе с потребителем вырабатываемой механической энергии с образованием теплообменника.

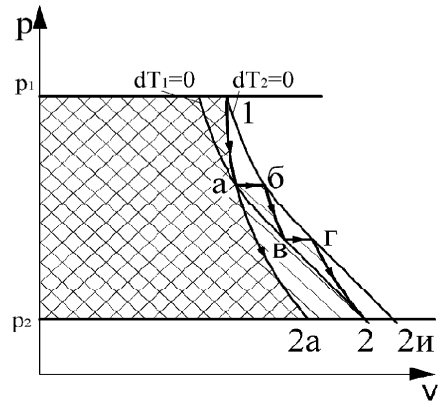
2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что газопроводы дополнительно снабжены интенсификаторами теплообмена в виде ребрения, позволяющего увеличить площадь теплопередающей поверхности и турбулизовать потоки теплоносителей.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что расширительная турбина выполнена в виде одного рабочего колеса радиального типа.

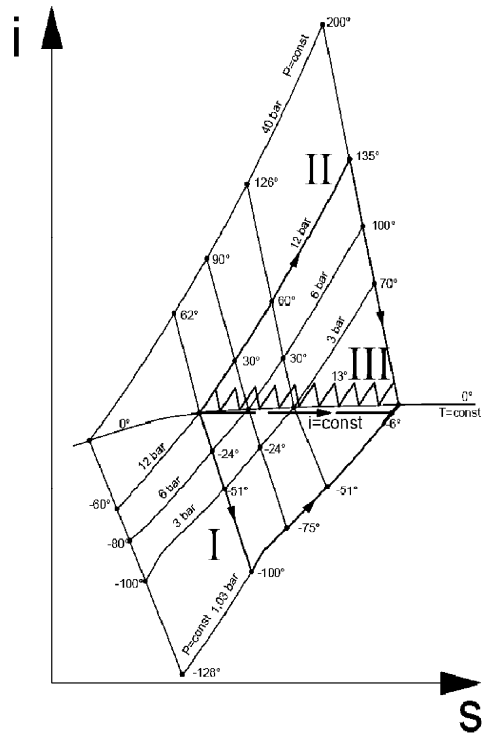
4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что на входе сопловых каналов по давлению на выходе из последней ступени расширения сопловых каналов выполнено регулировочное устройство.

5. Способ использования энергии перепада давления газообразного рабочего тела, осуществляемый в устройстве по пп.1-4, включающий многократное расширение газообразного рабочего тела и отвод вырабатываемой механической энергии, нагрев или охлаждение теплообменником в теплоносителе рабочего тела после каждого расширения, отличающийся тем, что многократное расширение рабочего тела производят последовательно на одном рабочем колесе со скоростью потока газообразного рабочего тела на выходе из сопловых каналов каждой ступени в пределах чисел Маха 0,3-0,5 и оптимальном отношении  $U/C_{ад} = 0,5$  в каждой ступени расширения с равными степенями понижения давления синхронно с теплоперепадом на каждой ступени расширения газообразного рабочего тела.

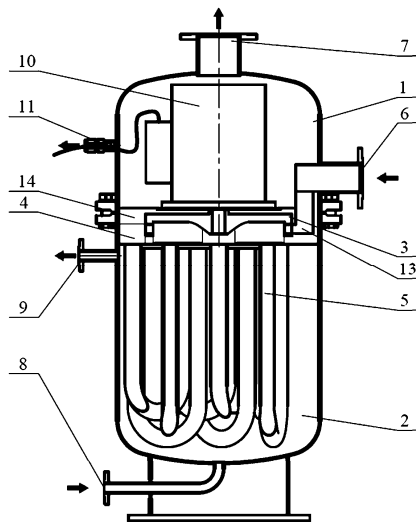




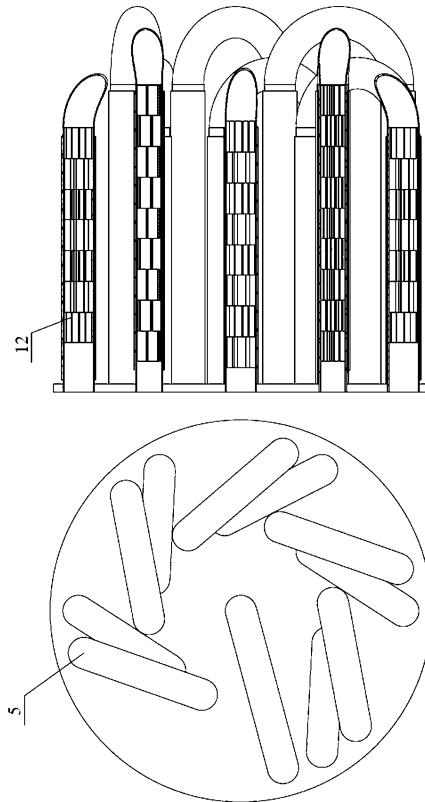
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

