

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **21623**

(13) **С1**

(46) **2018.02.28**

(51) МПК

F 25B 11/00 (2006.01)

(54)

**СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИИ ВАЛА ТУРБИНЫ
ТУРБОДЕТАНДЕРА**

(21) Номер заявки: а 20140558

(22) 2014.10.23

(43) 2016.06.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Автор: Кашеев Владимир Петрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) RU 2200916 С2, 2002.

SU 242923 А, 1985.

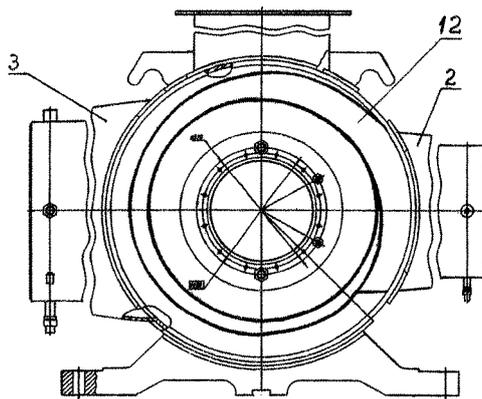
SU 500434, 1976.

SU 262916, 1970.

RU 2158398 С1, 2000.

(57)

Способ снижения вибрации вала турбины турбодетандера, при котором перед сопловыми аппаратами турбодетандера устанавливают устройство ввода природного газа, выполненное в виде улитки, высота канала которого уменьшается в направлении вращения ротора турбодетандера, осуществляют подачу природного газа через упомянутое устройство ввода в сопловые аппараты, создавая одинаковое давление на входе в каждый сопловый аппарат, величина которого составляет до 3-7 % от величины давления подачи природного газа.



Фиг. 1

Изобретение относится к области энергетики, в частности к энергетическим установкам, утилизирующим энергию избыточного давления газа, предназначенного для сгорания, на входе в топочные устройства.

ВУ 21623 С1 2018.02.28

ВУ 21623 С1 2018.02.28

В настоящее время проблема рекуперации энергии избыточного давления природного газа на узлах его редуцирования считается одним из наиболее перспективных направлений в области энергосбережения [1].

По существующим магистральным газопроводам газ транспортируется с давлением до 5,5-8,0 МПа. По отводам от газопроводов газ направляется к газораспределительным станциям (ГРС) и газораспределительным пунктам (ГРП), в которых давление газа уменьшается до значений 1,2 и 0,15 МПа соответственно. Для преобразования потенциальной энергии избыточного давления газа в механическую энергию для привода тех или других необходимых потребителей агрегатов используются турбодетандерные установки.

Известна утилизационная детандерная энергетическая установка и способ ее работы [2].

Способ включает подачу природного газа в турбодетандер, работу газа в нем и удаление газа из него. Причем вводят природный газ в турбодетандер и удаляют из него по одному патрубку, для ввода и удаления соответственно.

Недостатком известного способа и устройства на его основе является низкая эффективность из-за неравномерной раздачи природного газа по отдельным сопловым аппаратам - вблизи патрубка ввода газа расход повышенный, а на периферии - пониженный.

Известна утилизационная детандерная энергетическая установка УТДУ-2500 и способ ее работы [3] - прототип.

Способ работы турбодетандера включает подачу природного газа в турбодетандер, распределение газа по сопловым аппаратам расширительного устройства - газовой турбины, разгон в них газа - превращение потенциальной энергии газа в кинетическую энергию его потока, преобразование этой энергии в механическую энергию вращения турбины на ее рабочих лопатках и удаление газа из турбодетандера.

Утилизационная детандерная энергетическая установка УТДУ-2500 включает турбодетандер, электрогенератор, регулятор частоты вращения, блок-бокс системы управления. Кроме основного оборудования установки в ее состав входят: огневой подогреватель газа, вихревое сепарирующее устройство и теплообменник масло-газ для охлаждения масла на выходе из турбодетандера.

Собственно турбодетандер включает наружный силовой корпус и внутренний корпус-вставку. В последнюю входят: ротор с узлами подшипников и набор обойм сопловых лопаток. Собранная вставка свободно помещается в наружный корпус и закрепляется в нем винтами. Слева к вставке крепится ограничитель максимальной частоты вращения, а справа - детали муфты соединения с рессорой привода электрогенератора.

Подобная конструкция турбодетандера с легкоъемным внутренним корпусом-вставкой весьма удобна при монтажных работах, сборке и при проведении регламентных работ; она типична для всех турбодетандеров, разработанных в АО "Турбогаз".

Недостатком способа и устройства на его основе является значительное снижение эффективности ее работы при повышенных расходах газа из-за неравномерной раздачи природного газа по отдельным сопловым аппаратам - вблизи патрубка ввода газа расход повышенный, а на периферии - пониженный.

Задачей изобретения является повышение эффективности работы установки путем снижения вибрации вала турбины турбодетандера, что приводит к увеличению ее удельной мощности и надежности, особенно в переменных режимах.

В результате решения данной задачи достигается новый технический результат, характеризующийся устранением псевдопарциального подвода природного газа, что снижает вибрацию вала турбины турбодетандера.

Данный технический результат достигается тем, что в способе снижения вибрации вала турбины турбодетандера, при котором перед сопловыми аппаратами турбодетандера устанавливают устройство ввода природного газа, выполненное в виде улитки, высота канала которого уменьшается в направлении вращения ротора турбодетандера, осуществ-

BY 21623 C1 2018.02.28

ляют подачу природного газа через упомянутое устройство ввода в сопловые аппараты, создавая одинаковое давление на входе в каждый сопловой аппарат, величина которого составляет до 3-7 % от величины давления подачи природного газа.

Технический результат изобретения характеризуется устранением псевдопарциального подвода природного газа, что снижает вибрацию вала турбины турбодетандера.

Изобретение поясняется фигурами, где на

фиг. 1 и 2 изображен турбодетандер, использующий один из вариантов предлагаемого способа;

фиг. 3 - продольный разрез функционального узла с опорой и направляющим аппаратом с конфузуром, являющийся боксом-корпусом для размещения комплекта неподвижных лопаточных сопловых аппаратов - "вставка" турбодетандера.

Лучший вариант способа реализован по фиг. 1-3 турбодетандером утилизационной детандерной энергетической установки, имеющим наружный корпус 1, патрубок 2 ввода и патрубок 3 вывода природного газа, закрепленные на внешней стороне этого корпуса 1, в который свободно помещен и закреплен винтами по фиг. 3 легкоъемный функциональный узел - "вставка" с опорой 4 и направляющим аппаратом - конфузуром 5, являющаяся боксом-корпусом для размещения комплекта неподвижных лопаточных сопловых аппаратов 6, подвижного ротора 7 с дисками 8, снабженными рабочими лопатками 9, опорных и упорных подшипников 10 скольжения гидродинамического типа, торцовых уплотнений 11. В наружном корпусе 1 перед входом в комплект неподвижных лопаточных сопловых аппаратов 6 размещено улиточное (один из возможных вариантов способа) устройство 12 транспортировки газа на его лопатки.

Способ реализован турбодетандером, работающим следующим образом.

Природный газ при давлении 1,2 МПа и температуре около 15 °С поступает в турбодетандер, срабатывает теплоперепад и при давлении 0,09 МПа и температуре около 0 °С покидает его. Вырабатываемая мощность в номинальном режиме - 2,5 МВт.

Потенциальная энергия газа в неподвижных лопаточных сопловых аппаратах 6 преобразуется в кинетическую энергию его потока, а затем на рабочих лопатках 9 за счет поворота потока газа трансформируется в механическую энергию вращения ротора 7 и через муфту передается электрогенератору, в котором превращается в электрическую энергию. При определенной частоте вращения ротора 7 он "всплывает" в подшипниках 10 и начинает вращаться в масляном клине. Подвод масла к подшипникам 10 производится от главного маслососа по сверлениям в соответствующих корпусах подшипников 10. Торцовые уплотнения 11 препятствуют выходу природного газа из турбодетандера, а в последней ступени - и попадания туда атмосферного воздуха. Так как патрубок 2 ввода газа один, а сопловые аппараты 6 расположены по окружности, то вблизи ввода газа в турбодетандере - прототипе наблюдается повышенный расход и скорость газа через сопловые аппараты 6 в окрестностях ввода газа и пониженный расход через них на периферии. Установка в наружном корпусе 1 перед входом в комплект неподвижных лопаточных сопловых аппаратов 6 устройства 12, имеющего форму улитки, при этом высота канала улиточного транспортирующего устройства уменьшается в направлении вращения ротора, выравнивая распределение давлений по сопловым аппаратам 6 по окружности ввода газа. Благодаря этому происходит равномерное распределение расходов природного газа по сопловым аппаратам 6, из-за чего все они работают в оптимальном режиме, снижаются вибрации вала турбины турбодетандера, что повышает эффективность преобразования потенциальной энергии в кинетическую, уменьшаются потери кинетической энергии на трение в тех каналах, где без этого устройства была повышенная скорость газа, т.к. потери на трение пропорциональны скорости газа в квадрате. Это позволяет увеличить расход газа через турбодетандер, что увеличивает его мощность. Кроме того, устранено неполное использование потенциальной энергии сжатого природного газа, подаваемого на входной патрубок установки, происходившее из-за потерь на работу расширения газа за входным патрубком

в объем корпуса турбодетандера и далее на работу сжатия этого газа на входе в комплект неподвижных лопаточных сопловых аппаратов, при подаче газа на лопатки первого неподвижного соплового аппарата.

Увеличение расхода природного газа - рабочего тела через установку повышает его мощность во время ее непрерывной работы за счет отмены ежедневного технического обслуживания подшипниковых узлов, включенного в требования технического обслуживания детандерной установки. Распределение газа по сопловым аппаратам осуществляют путем создания одинакового давления на входе в каждый из них до 3-7 % от величины подачи давления природного газа в турбодетандер.

Физическая сущность изобретения.

Надежность детандерной установки зависит прежде всего от вибрационной надежности турбодетандера. Вибрациям подвержены и ротор, и его части: турбинные диски и посаженные на них венцы лопаток.

Вибрации или колебания этих деталей возбуждаются воздействием проходящего природного газа. Газ, расширяясь в сопловых аппаратах и между лопатками на турбинных дисках, оказывает на ротор значительные воздействия сложного характера. При этом можно выделить следующие явления.

Нагружение ротора и подшипников при неравномерной подаче газа по окружности входного устройства в неподвижные лопаточные сопловые аппараты. Возбуждение вынужденных колебаний газа протекающим через комплект неподвижных сопловых аппаратов к лопаткам турбинных дисков ротора. Возбуждение автоколебаний ротора при таком же течении газа. Возбуждение колебаний ротора при колебаниях расхода природного газа.

Вынужденные колебания возникают вследствие местных изменений скорости газа при вращении турбинных дисков с лопатками жестко связанных с ротором внутри комплекта неподвижных лопаточных сопловых аппаратов. При этом лопатки турбинных дисков ротора испытывают воздействие в виде гармонических колебаний с круговыми частотами - $v_{л.к.}$: $v_{л.к.} = k \cdot n \cdot \omega$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, ω - угловая скорость вращения ротора, а n - число лопаток неподвижного соплового аппарата.

Воздействие переменных сил передается также на вал ротора и возбуждает его колебания. Погрешности шага лопаток, вызванные неточностью изготовления дисков, приводят к колебаниям ротора с более низкими частотами v_k , кратными частоте вращения ω :

$$v_k = k \cdot \omega, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots$$

Еще опаснее автоколебания, возбуждаемые действием природного газа. При случайном поперечном смещении (x) ротора и приближении его турбинных дисков к неподвижным сопловым направляющим лопаточных аппаратов нарушается симметрия тангенциальных сил, действующих на турбинные диски.

При этом появляется неуравновешенная гидромеханическая сила $P_{н.в}$, содержащая те же составляющие, что и сила, воздействующая на цапфу со стороны смазочного слоя.

В обеих силах основное возбуждение колебаний проявляется под влиянием псевдогироскопической составляющей.

Эта составляющая гидромеханической силы ($P_{н.в}$) имеет приближенную величину:

$$P_{н.в} = N_{т.и.} / R_k \cdot \omega \cdot h,$$

где $N_{т.и.}$ - часть мощности детандерной установки, вырабатываемой на одном турбинном диске, R_k - радиус турбинного диска, ω - угловая скорость вращения ротора, h - линейная величина, приближенно равная высоте лопатки на турбинном диске.

В турбодетандере главная возбуждающая колебания силовая составляющая направлена по вращению ротора примерно так же, как и псевдогироскопическая сила со стороны смазочного слоя.

Колебания ротора вызывают изменение форм кавитации смазочного слоя. Следствием этого явления будут скачки амплитуды колебаний ротора, похожие на пики резонансов. Эти явления наблюдались при попытке работы прототипа - детандерной установки на по-

ВУ 21623 С1 2018.02.28

вышенных расходах природного газа. То есть первой причиной пониженной мощности детандерной энергетической установки является неравномерность подачи природного газа на лопатки неподвижных сопловых аппаратов и далее на лопатки венцов турбинных дисков. Второй причиной является неполное использование потенциальной энергии сжатого природного газа, подаваемого на входной патрубок установки, из-за потерь на работу расширения газа за входным патрубком в объем корпуса турбодетандера и далее на работу сжатия этого газа на входе в кольцевой канал, подающий газ на лопатки первого неподвижного соплового аппарата.

Обе эти причины устраняются за счет того, что создают условия для равномерного распределения газа по сопловым аппаратам путем создания одинакового давления на входе в каждый из них, величина которого составляет до 3-7 % от величины подачи давления природного газа в турбодетандер. Это достигается благодаря установке устройства ввода газа в сопловые аппараты. Причем устройства ввода газа, кроме сопловых аппаратов, могут представлять собой направляющие аппараты, решетки, перфорированные пластины, пористые перегородки, регуляторы расхода по каждому направляющему аппарату в виде клапанов, конфузоров, диафрагм, других местных сопротивлений и т.д.

В этом случае исключаются потери энергии газа на работу его расширения и далее на работу сжатия. В случае придания устройству транспортировки газа оптимальной вышеуказанной формы обеспечивается максимальная равномерность раздачи газа по окружности кольцевого канала подвода газа, а мощность детандерной установки возрастает дополнительно за счет использования кинетической энергии подводимого газа.

Как показала работа детандерной установки на мощности, обеспечение полной равномерности раздачи газа по окружности за счет установки устройства ввода газа в сопловые аппараты привело к тому, что амплитуда вынужденных колебаний снизилась в 8-10 раз при равных расходах газа, а амплитуда автоколебаний в 12-14 раз.

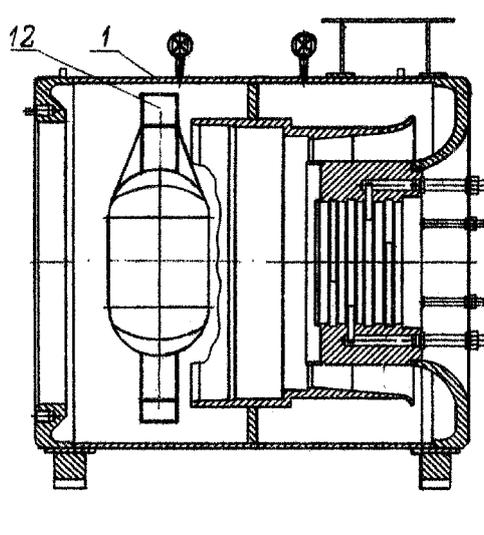
Этот результат позволил увеличить как расход газа через установку (то есть ее мощность), так и время ее непрерывной работы на высоких расходах газа, что обеспечило повышение эффективности установки и надежность ее работы.

Экспериментальные работы показали, что указанные пределы подачи равномерности давления газа за счет исключения вентиляторного эффекта, т.е. устранения псевдопарциального подвода газа, снижают вибрации вала турбины, что приводит к повышению срока службы лопаток и стабилизации повышения мощности турбодетандера, снижают потери на трение из-за вибраций.

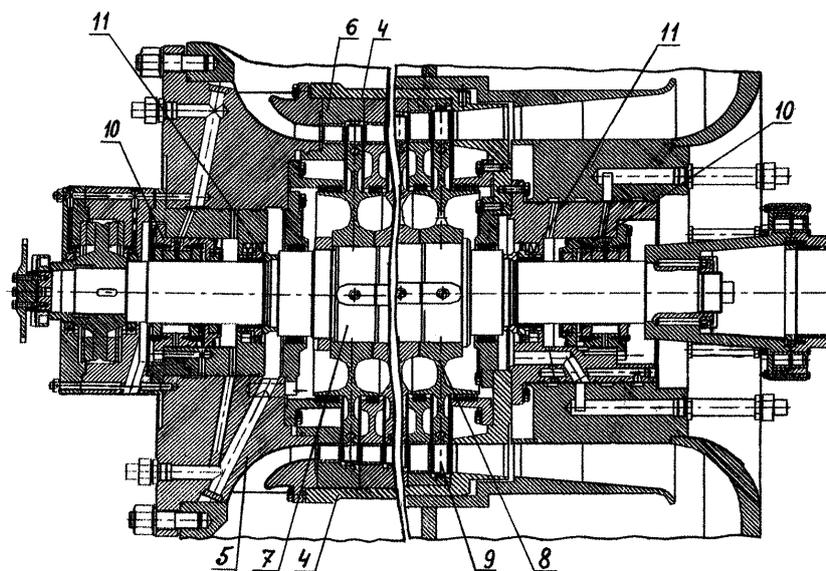
Изобретение предполагается использовать в системе "БЕЛЭНЕРГО".

Источники информации:

1. Степанец А.А. Энергосберегающие турбодетандерные установки / Под ред. А.Д. Трухня. - М.: ООО "Недра-бизнесцентр", 1999. - С. 201-228.
2. Патент РФ 2.047.059, МПК F 25 В 11/00, 1995.
3. Комплект оборудования утилизационной детандерной энергетической установки УДЭУ-2500-УХЛ4. Руководство по эксплуатации. Концерн БЕЛЭНЕРГО РУП БЕЛНИПИЭНЕРЕОПРОМ. - С. 44-48.



Фиг. 2



Фиг. 3