



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*F01K 25/103* (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018121581, 13.06.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
13.06.2018

Дата регистрации:  
04.10.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.06.2018

(45) Опубликовано: 04.10.2019 Бюл. № 28

Адрес для переписки:  
195298, Санкт-Петербург, ул. Ленская, 19, корп.  
2, кв. 360, Верткину Михаилу Аркадьевичу

(72) Автор(ы):

**Верткин Михаил Аркадьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Верткин Михаил Аркадьевич (RU)**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RAHUL A. BIDKAR** и др., **Conceptual Designs of 50 MWe and 450 MWe Supercritical CO<sub>2</sub> Turbomachinery Trains for Power Generation from Coal. Part 1: Cycle and Turbine, The 5th International Symposium - Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles, San Antonio, Texas, 28-31 march 2016. CN 106870037 A, 20.06.2017. RU 2616148 C2, 12.04.2017. RU 2380548 C2, 27.01.2010.** (см. прод.)

## (54) КОТЛОТУРБИННАЯ ДИОКСИД-УГЛЕРОДНАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к теплоэнергетике и может быть использовано для повышения КПД и снижения металлоемкости котла котлотурбинной диоксид-углеродной энергоустановки (CO<sub>2</sub>-ЭУ), использующей диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) в качестве рабочего тела. Котлотурбинная CO<sub>2</sub>-ЭУ содержит котел 1 с перегревателем 2 CO<sub>2</sub> высокого давления (CO<sub>2</sub> в.д.), турбину 3, состоящую из двух турбин высокого и низкого давления (ТВД и ТНД) 3а и 3б, сообщенную на входе по CO<sub>2</sub> в.д. с выходом перегревателя 2 по CO<sub>2</sub> в.д., рекуператор 4, состоящий из высокотемпературного рекуператора (ВТР) 4а и низкотемпературного рекуператора (НТР) 4б, сообщенный на выходе по нагреваемому CO<sub>2</sub> в.д. с входом перегревателя 2 по CO<sub>2</sub> в.д., на входе по CO<sub>2</sub> низкого давления (CO<sub>2</sub> н.д.) - с выходом ТНД 3б по CO<sub>2</sub> н.д., охладитель 5, сообщенный на входе по CO<sub>2</sub> н.д. с выходом НТР 4б по CO<sub>2</sub> н.д., и компрессор 6,

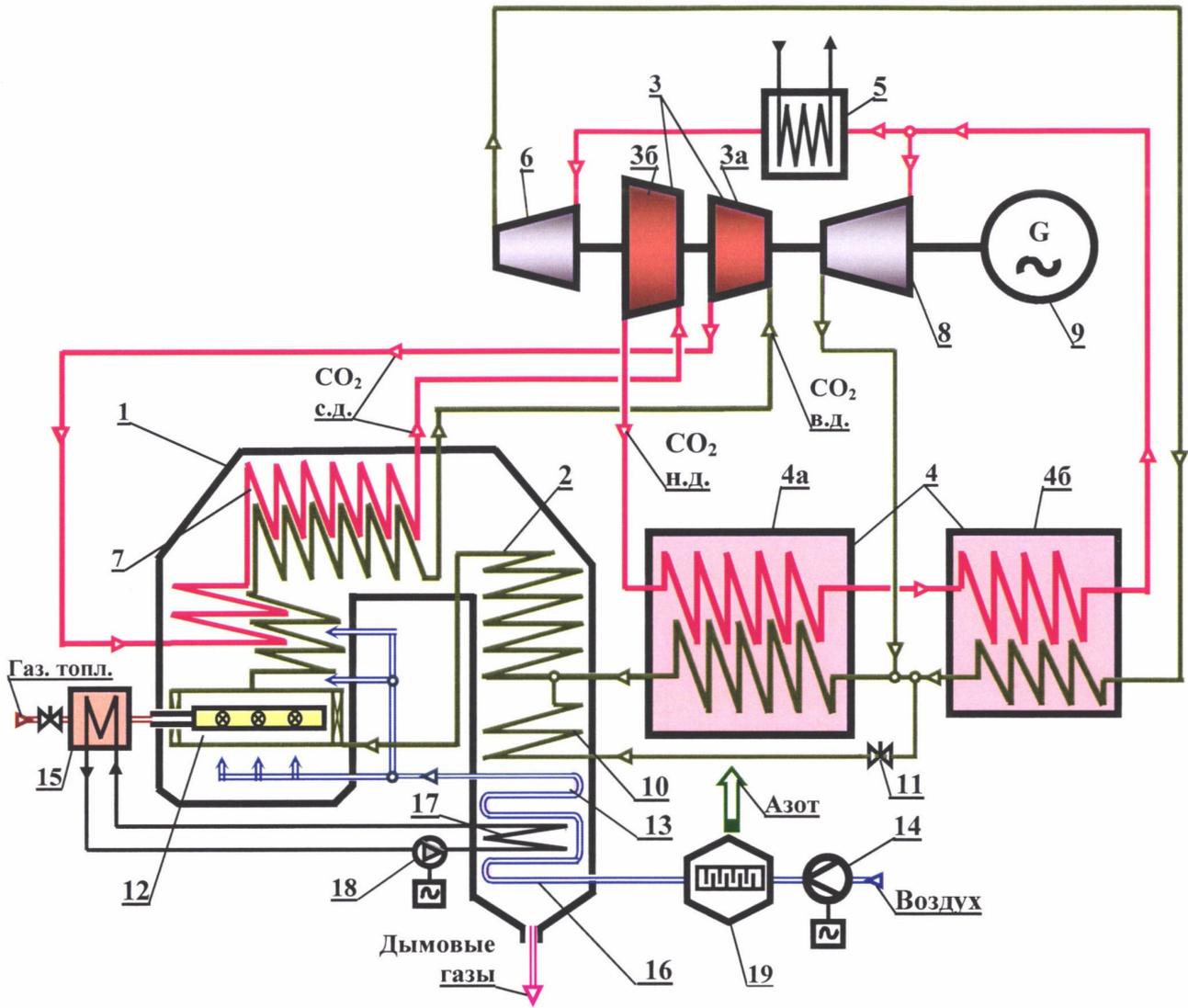
сообщенный на входе по CO<sub>2</sub> н.д. с выходом охладителя 5 по CO<sub>2</sub> н.д., на выходе по CO<sub>2</sub> в.д. - с входом НТР 4б по CO<sub>2</sub> в.д. Котел содержит байпасный подогреватель (БП) 10, установленный в газовом тракте котла за перегревателем 2, сообщенный на выходе по CO<sub>2</sub> в.д. с входом перегревателя 2 по CO<sub>2</sub> в.д., на входе по CO<sub>2</sub> в.д. - с выходом НТР 4б по CO<sub>2</sub> в.д., регулирующийся клапан (РК) 11, установленный на линии подачи CO<sub>2</sub> в.д. из НТР 4б в БП 10 в обеспечение возможности регулирования подачи CO<sub>2</sub> в.д. в БП 10 по условию равенства температур CO<sub>2</sub> в.д. на выходах БП 10 и ВТР 4а по CO<sub>2</sub> в.д., топку 12, работающую на газовом топливе, и воздухоподогреватель (ВП), состоящий из высокотемпературной и низкотемпературной ступеней 13 и 16 и установленный в газовом тракте котла за БП 10. Котлотурбинная CO<sub>2</sub>-ЭУ содержит жидкостный подогреватель топлива 15, газожидкостный теплообменник 17, установленный между ступенями ВП 3 и 16, и

RU  
2 7 0 2 2 0 6  
C 1

RU  
2 7 0 2 2 0 6  
C 1

воздухоразделительную установку 19, сообщенную на входе по воздуху с окружающей средой, на выходе по обогащенному кислородом воздуху - с входом низкотемпературной ступени

16 ВП по воздуху. Изобретение позволяет повысить КПД котла и котлотурбинной CO<sub>2</sub>-ЭУ. 3 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг.2

(56) (продолжение):  
 CN 108005744 A, 08.05.2018.

RU 2702206 C1

RU 2702206 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*F01K 25/103 (2019.02)*

(21)(22) Application: **2018121581, 13.06.2018**

(24) Effective date for property rights:  
**13.06.2018**

Registration date:  
**04.10.2019**

Priority:

(22) Date of filing: **13.06.2018**

(45) Date of publication: **04.10.2019** Bull. № 28

Mail address:

**195298, Sankt-Peterburg, ul. Lenskaya, 19, korp.  
2, kv. 360, Vertkinu Mikhailu Arkadevichu**

(72) Inventor(s):

**Vertkin Mikhail Arkadevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Vertkin Mikhail Arkadevich (RU)**

(54) **BOILER-TURBINE DIOXIDE-CARBON POWER PLANT**

(57) Abstract:

FIELD: power engineering.

SUBSTANCE: invention relates to heat engineering and can be used to increase efficiency and reduce metal consumption of a boiler of a boiler turbine dioxide-carbon power plant (CO<sub>2</sub>-PP) using carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as working medium. Boiler turbine CO<sub>2</sub>-PP contains boiler 1 with superheater 2 CO<sub>2</sub> high pressure (CO<sub>2</sub> h.p.), turbine 3 consisting of two high and low pressure (HPT and LPT) turbines 3a and 3b communicated at CO<sub>2</sub> h.p. inlet with superheater 2 to CO<sub>2</sub> h.p. output, recuperator 4 consisting of high-temperature recuperator HTR 4a and low-temperature recuperator LTR 4b communicated at outlet via heated CO<sub>2</sub> h.p. with superheater 2 input to CO<sub>2</sub> h.p., at CO<sub>2</sub> low pressure inlet (CO<sub>2</sub> l.p.) – with output of LPT 3b by CO<sub>2</sub> l.p., cooler 5 communicated at CO<sub>2</sub> l.p. inlet with output of LTR 4b by CO<sub>2</sub> l.p., and compressor 6 communicated at CO<sub>2</sub> l.p. inlet with coolant 5 output by CO<sub>2</sub> l.p., at output by CO<sub>2</sub> h.p. – with input of LTR

4b by CO<sub>2</sub> h.p. Boiler comprises bypass heater (BH) 10, installed in gas channel of boiler behind superheater 2, communicated at CO<sub>2</sub> h.p. output with superheater 2 input to CO<sub>2</sub> h.p., at CO<sub>2</sub> h.p. inlet – with output of LTR 4b by CO<sub>2</sub> h.p., control valve (CV) 11 installed on CO<sub>2</sub> h.p. supply line from LTR 4b to BH 10 to allow adjustment of CO<sub>2</sub> h.p. supply in Bh 10 by condition of equality of temperatures CO<sub>2</sub> h.p. at outputs Bh 10 and HYR 4a by CO<sub>2</sub> h.p., furnace 12 operating on gas fuel, and air heater (AH), consisting of high-temperature and low-temperature stages 13 and 16 and installed in boiler gas circuit behind BH 10. Boiler turbine CO<sub>2</sub>-PP contains liquid fuel heater 15, gas-liquid heat exchanger 17 installed between stages of AH 3 and 16, and air separation unit 19 communicated at air inlet with environment, at outlet of oxygen-enriched air – with inlet of low-temperature stage 16 of AH by air.

EFFECT: invention allows increasing efficiency of boiler and boiler-turbine CO<sub>2</sub>-PP.

4 cl, 2 dwg

RU 2 702 206 C1

RU 2 702 206 C1



Изобретение относится к теплоэнергетике и может быть использовано для повышения КПД или для снижения металлоемкости котла котлотурбинной диоксид-углеродной энергоустановки без снижения ее КПД.

Диоксид-углеродные (углекислотные) энергоустановки (CO<sub>2</sub>-ЭУ) - это тепловые энергоустановки, использующие диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) в качестве рабочего тела. В отличие от обычных паротурбинных энергоустановок, реализующих цикл Ренкина, в CO<sub>2</sub>-ЭУ, как правило, реализуют газотурбинный замкнутый регенеративный цикл при сверхкритическом давлении CO<sub>2</sub> перед турбиной. В котлотурбинных CO<sub>2</sub>-ЭУ подвод 10 теплоты в цикл производится в котле. Преимуществами котлотурбинных CO<sub>2</sub>-ЭУ по сравнению с обычными паротурбинными блоками сверхкритического давления являются более высокий КПД при нагреве рабочего тела до температуры выше 650-700°С, отсутствие затрат на нейтрализацию и отвод сточных вод и на очистку поверхностей теплообмена парогенератора от накипи, компактность турбин и охладителей CO<sub>2</sub> (по 15 сравнению с паровыми турбинами и конденсаторами).

Ниже приведен перечень сокращений и основных терминов, используемых в настоящем описании, и их определений, согласно ГОСТ Р 51852-2001 «Установки газотурбинные. Термины и определения», ГОСТ Р 54974-2012. «Котлы стационарные паровые, водогрейные и котлы-утилизаторы. Термины и определения» и другим, в т.ч. 20 зарубежным, источникам):

Используемые сокращения:

БП - байпасный подогреватель CO<sub>2</sub> в.д. котла;

ВП - воздухоподогреватель;

ВРУ - воздухоразделительная установка;

ВТР - высокотемпературный рекуператор (высокотемпературная ступень рекуператора);

НТР - низкотемпературный рекуператор (низкотемпературная ступень рекуператора);

ТВД - турбина высокого давления;

ТНД - турбина низкого давления;

ЭУ - энергоустановка;

CO<sub>2</sub> - диоксид углерода (углекислый газ);

CO<sub>2</sub> в.д. - углекислый газ высокого давления;

CO<sub>2</sub> н.д. - углекислый газ низкого давления;

CO<sub>2</sub> с.д. - углекислый газ высокого давления;

CO<sub>2</sub>-ЭУ - диоксид-углеродная энергоустановка:

sCO<sub>2</sub> - углекислый газ (диоксид углерода) при сверхкритическом давлении.

Газотурбинный двигатель, ГТД - машина, предназначенная для преобразования 40 тепловой энергии в механическую, состоящая из одного или нескольких компрессоров, одного или нескольких тепловых устройств (в данном случае - перегревателей CO<sub>2</sub>, являющихся частью котельной установки), в которых повышается температура рабочего тела, одной или нескольких газовых турбин, вала отбора мощности, системы управления и необходимого вспомогательного оборудования.

Регенератор/рекуператор: Теплообменный аппарат, предназначенный для передачи 45 теплоты отработавших (расширившихся) в турбине газов (в данном случае CO<sub>2</sub> низкого давления, далее CO<sub>2</sub> н.д.) рабочему телу (в данном случае CO<sub>2</sub> высокого давления,

далее, CO<sub>2</sub> в.д.).

Газотурбинный двигатель регенеративного цикла: Газотурбинный двигатель, термодинамический цикл которого отличается наличием регенеративного подогрева в регенераторе/рекуператоре сжатого в компрессоре рабочего тела (в данном случае CO<sub>2</sub> в.д.) теплом отработанного (расширившегося в турбине) рабочего тела (CO<sub>2</sub> н.д.) за турбиной перед подачей CO<sub>2</sub> в.д. на нагрев во внешнем источнике тепла (в данном случае - в котле) с целью снижения расхода тепла в цикл и повышения КПД цикла.

Газотурбинный двигатель замкнутого цикла: Газотурбинный двигатель, в котором рабочее тело циркулирует по замкнутому контуру без связи с атмосферой; отвод теплоты от отработанного рабочего тела производится через охладитель.

Основной компрессор, или компрессор (compressor): Компрессор, осуществляющий сжатие рабочего тела низкого давления (н.д.), предварительно охлажденного в рекуператоре и охладителе.

Рекомпрессинг (recompressing): Применяемое в газотурбинном замкнутом регенеративном цикле параллельное сжатие отработанного рабочего тела за рекуператором, но не охлажденном в охладителе, что повышает КПД цикла, если теплоемкость сжатого рабочего тела существенно превосходит теплоемкость рабочего тела н.д. при той же температуре (что характерно для sCO<sub>2</sub>).

Рекомпрессор (recompressor): Компрессор, осуществляющий рекомпрессинг (параллельно с основным компрессором).

Топка котла: Устройство котла, предназначенное для сжигания органического (в данном случае - газового или жидкого) топлива и частичного охлаждения продуктов сгорания (дымовых газов) с отводом тепла рабочему телу через экранные поверхности теплообмена.

Воздухоподогреватель котла (ВП котла): Устройство для подогрева воздуха продуктами сгорания топлива перед подачей в топку котла.

Рекуперативный воздухоподогреватель котла: ВП котла, в котором передача теплоты от продуктов сгорания (дымовых газов) к воздуху осуществляется через разделяющую их теплообменную поверхность.

Регенеративный воздухоподогреватель котла: ВП котла, в котором передача теплоты от дымовых газов к воздуху осуществляется через одни и те же периодически нагреваемые и охлаждаемые теплообменные поверхности.

Регенеративный вращающийся воздухоподогреватель котла: Регенеративный воздухоподогреватель котла с вращающейся теплообменной поверхностью.

Воздухоподогреватель котла с промежуточным теплоносителем: Рекуперативный воздухоподогреватель котла, в котором передача теплоты от продуктов сгорания топлива к воздуху осуществляется за счет нагрева и охлаждения промежуточного теплоносителя.

Опускная конвективная шахта: Вертикальный газоход с размещенными в нем конвективными поверхностями нагрева и движением газа сверху вниз (в хвостовой части котла).

Размещение газожидкостного теплообменника в рассечку воздухоподогревателя - размещение поверхностей теплообмена газожидкостного теплообменника между поверхностями воздухоподогревателя. Возможный вариант исполнения - воздухоподогреватель выполнен многоступенчатым, а поверхности нагрева жидкости установлены между ступенями (ходами) воздухоподогревателя [патент СССР 950997].

Известна котлотурбинная CO<sub>2</sub>-ЭУ, предложенная в работе "An investigation of the

supercritical CO<sub>2</sub> cycle (Feher cycle) for shipboard application" (автор - O.V. Combs, США, 1977 г.) для применения в судовых силовых установках. Данная CO<sub>2</sub>-ЭУ, реализующая простейший регенеративный цикл Брайтона (или цикл Фехера - Feher cycle), схематически изображенная на фиг. 1 на листе 17 указанного источника, содержит первичный источник  
 5 тепла - перегреватель CO<sub>2</sub> котла, турбину, сообщенную на входе по CO<sub>2</sub> высокого давления (в.д.) с выходом перегревателя CO<sub>2</sub> котла (линия 4) по CO<sub>2</sub> в.д., рекуператор, сообщенный на входе по греющему CO<sub>2</sub> н.д. с выходом турбины по отработанному CO<sub>2</sub> (линия 5), охладитель CO<sub>2</sub>, сообщенный на входе по охлаждаемому CO<sub>2</sub> с выходом  
 10 рекуператора по греющему CO<sub>2</sub> н.д. (линия 6), компрессор, сообщенный на входе по CO<sub>2</sub> н.д. с выходом охладителя CO<sub>2</sub> по охлаждаемому CO<sub>2</sub> (линия 1), на выходе по CO<sub>2</sub> в.д. - с входом рекуператора по нагреваемому CO<sub>2</sub> в.д. (линия 2), рекуператор на выходе по нагреваемому CO<sub>2</sub> в.д. сообщен с входом перегревателя CO<sub>2</sub> котла по нагреваемому  
 15 CO<sub>2</sub> в.д. (линия 3). Недостатком данного устройства является недостаточно высокий КПД цикла из-за большой величины недогрева CO<sub>2</sub> в.д. в рекуператоре до температуры отработанного CO<sub>2</sub> н.д. за турбиной вследствие того, что теплоемкость нагреваемого CO<sub>2</sub> в.д. в рекуператоре значительно выше теплоемкости греющего CO<sub>2</sub> н.д.

Указанный недостаток устранен в регенеративном цикле Брайтона с  
 20 рекомпрессингом, реализованном в ближайшем аналоге заявляемого устройства (прототипе) - котлотурбинной диоксид-углеродной энергоустановке, представленной в статье "Conceptual Designs of 50 MWe and 450 MWe Supercritical CO<sub>2</sub> Turbomachinery  
 25 Trains for Power Generation from Coal. Part 1: Cycle and Turbine"/VD. Hofer и др. // The 5th International Symposium - Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles, San Antonio, TX, 2016, fig 1 (b)), содержащей котел с перегревателем CO<sub>2</sub> в.д. котла HEATER, турбину, состоящую из  
 30 двух турбин высокого и низкого давления (НПТ и ЛРТ), сообщенную на входе по CO<sub>2</sub> в.д. (5) с выходом перегревателя HEATER по CO<sub>2</sub> в.д., рекуператор, состоящий из двух ступеней - высокотемпературного рекуператора (ВТР) HIGT TEMP RECUPER и низкотемпературного рекуператора (НТР) LOW TEMP RECUP, сообщенный на выходе по нагреваемому CO<sub>2</sub> в.д. с входом перегревателя котла по CO<sub>2</sub> в.д. (4), на входе по  
 35 греющему теплоносителю (8) - с выходом по CO<sub>2</sub> н.д. последней по ходу рабочего тела турбины - турбины н.д. ЛРТ, охладитель CO<sub>2</sub> н.д., состоящий из конденсатора CONDENSER и переохладителя CO<sub>2</sub> н.д. SUB COOL, сообщенный на входе по CO<sub>2</sub> н.д. (10) с выходом последней по ходу греющего теплоносителя ступени рекуператора по CO<sub>2</sub> н.д. LOW TEMP RECUP, и компрессор COMP, сообщенный на входе по CO<sub>2</sub> н.д. (1) с выходом охладителя по охлажденному CO<sub>2</sub> н.д., на выходе по CO<sub>2</sub> в.д. - с входом  
 40 последней по ходу CO<sub>2</sub> н.д. ступени рекуператора - LOW TEMP RECUP по CO<sub>2</sub> в.д. (2). Главное отличие данной CO<sub>2</sub>-ЭУ от предыдущего аналога состоит в применении дополнительного компрессора (рекомпрессора) RECOMP, сообщенного на входе по CO<sub>2</sub> н.д. с выходом НТР (LOW TEMP RECUP) по CO<sub>2</sub> н.д. (10), на выходе по CO<sub>2</sub> в.д. -  
 45 с входом ВТР (HIGT TEMP RECUPER) по CO<sub>2</sub> в.д. (3), обеспечивающего снижение расхода CO<sub>2</sub> н.д. через охладитель CO<sub>2</sub> н.д. с соответствующим снижением отвода тепла из цикла в окружающую среду и повышение температуры CO<sub>2</sub> в.д. на входе в

перегреватель CO<sub>2</sub> в.д. котла HEATER, что в итоге позволяет значительно повысить КПД цикла по сравнению с предыдущим аналогом.

Котел данной CO<sub>2</sub>-ЭУ содержит также промежуточный перегреватель CO<sub>2</sub> (RE-HEATER), турбина НРТ на выходе по CO<sub>2</sub> (6) сообщена с входом турбины LPT (7) через тракт промежуточного перегревателя CO<sub>2</sub>.

Как и в обычном сверхкритическом паротурбинном цикле, подвод тепла в прототипе осуществляется двумя источниками тепла - перегревателем CO<sub>2</sub> в.д. и промежуточным перегревателем; котел этой CO<sub>2</sub>-ЭУ предполагается выполненным по схеме, аналогичной схеме парового прямоточного котла сверхкритического давления [схема и краткое описание прямоточного парового котла сверхкритического давления приведены, например, в электронном ресурсе "StudFiles", в разделе 1.1 «Паровой котел. Общие устройство и определения», рис. 1.3, "<https://studfiles.net/preview/3828875/>], содержащим перегреватель CO<sub>2</sub> в.д., состоящий, условно, из низкотемпературного участка с движением теплоносителей по схеме противотока (аналог экономайзера в паровом котле) и высокотемпературной части, поверхности нагрева которой, а также промежуточные перегреватели размещены в газовом тракте котла до низкотемпературного участка перегревателя CO<sub>2</sub> в.д. по ходу дымовых газов.

КПД котлотурбинного энергоблока равен производству КПД цикла на КПД котла. Рекомпрессинг и промперегрев позволяют повысить КПД цикла. Но для повышения КПД котла, работающего на природном газе, необходимо снизить температуру уходящих дымовых газов хотя бы до 100-105°C. В котле прототипа, как и в обычных паровых котлах, никаких поверхностей теплообмена в газовом тракте котла за перегревателем CO<sub>2</sub> в.д., кроме воздухоподогревателя (ВП), не предусмотрено.

Охлаждение уходящих газов до достаточно низкой (по условию достижения приемлемого уровня КПД котла и энергоблока в целом) в прототипе предполагается обеспечить только за счет нагрева циклового воздуха в ВП. Однако если в сверхкритическом паротурбинном блоке температура питательной воды перед экономайзером не превышает 280°C, то в прототипе - в высокотемпературной CO<sub>2</sub>-ЭУ с рекомпрессингом и промперегревом - температура sCO<sub>2</sub> в.д. перед перегревателем составляет 545°C, т.е. на 265°C выше. Соответственно, и температура дымовых газов перед ВП в CO<sub>2</sub>-ЭУ-прототипе также будет выше на 265°C, чем в сверхкритическом паровом котле.

Расчетами, выполненными заявителем, установлено, что снижение температуры дымовых газов до обычного для паровых котлов уровня (100-110°C) только за счет регенеративного подогрева циклового воздуха в ВП с приемлемым уровнем металлоемкости и габаритов ВП не представляется возможным.

Так, при температурном напоре на холодном конце перегревателя CO<sub>2</sub> 20°C температура дымовых газов в прототипе составит 565°C. При коэффициенте избытка воздуха для газовых котлов 1,05 соотношение тепловых эквивалентов (произведений расхода на среднюю теплоемкость) со стороны дымовых газов и воздуха (при отсутствии присосов воздуха в ВП) составит 1,18-1,19. Следовательно, охлаждение дымовых газов в ВП котла с 565°C до 110°C (в отсутствие тепловых потерь на внешнее охлаждение) потребует нагреть воздух от плюс 15 до 552°C, т.е. даже при реализации чистого противотока температурный напор на горячем конце ВП составит 13°C, что приведет к чрезмерному увеличению поверхности теплообмена в высокотемпературной части ВП.

Целью заявляемого изобретения является устранение указанного недостатка и повышение КПД котла и котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ в целом или снижение металлоемкости ВП котла без снижения КПД котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ.

Основным техническим результатом является снижение потребного расхода тепла на подогрев циклового воздуха в обеспечение повышения КПД котла с учетом изменения КПД цикла и без увеличения габаритов и металлоемкости котла, что и гарантирует достижение заявленной цели.

Определение из перечня выявленных аналогов указанного прототипа как наиболее близкого технического решения по совокупности признаков позволило выявить в заявляемом устройстве определенную в нижеприведенной формуле изобретения совокупность существенных отличительных признаков по отношению к усматриваемому техническому результату.

Заявляемая котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ содержит котел с перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д., по крайней мере, одну турбину, сообщенную на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. с выходом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., рекуператор, состоящий из двух или более ступеней, сообщенный на выходе по нагреваемому  $\text{CO}_2$  в.д. с входом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., на входе по греющему  $\text{CO}_2$  н.д. - с выходом по  $\text{CO}_2$  н.д. последней по ходу рабочего тела турбины, охладитель, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом по  $\text{CO}_2$  н.д. последней по ходу греющего  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора, и компрессор, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом охладителя по охлажденному  $\text{CO}_2$  н.д., на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с входом последней по ходу  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора по  $\text{CO}_2$  в.д.

Согласно изобретению, котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ содержит байпасный подогреватель  $\text{CO}_2$  в.д. (БП), установленный в газовом тракте котла за перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д. котла, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. с выходом по  $\text{CO}_2$  в.д. второй по ходу греющего  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора, на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с входом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., и выполненный с возможностью регулирования подачи  $\text{CO}_2$  в.д. в БП по условию равенства температур  $\text{CO}_2$  в.д. на выходах БП и рекуператора по  $\text{CO}_2$  в.д., а котел содержит топку, работающую на газовом или жидком топливе, и воздухоподогреватель котла, установленный в газовом тракте котла за байпасным подогревателем  $\text{CO}_2$  в.д.

Воздухоподогреватель (ВП) котла может быть выполнен в виде рекуперативного или регенеративного газового ВП, установленного в газовом тракте котла за БП.

Котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ может также содержать жидкостный подогреватель топлива и газожидкостный теплообменник, сообщенный на входе и выходе по нагреваемой жидкости соответственно с выходом и входом жидкостного подогревателя топлива по греющей жидкости, при этом поверхности нагрева газожидкостного теплообменника размещены в газовом тракте котла в рассечку поверхностей нагрева газового воздухоподогревателя..

Котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ может быть также снабжена воздухоразделительной установкой (ВРУ), сообщенной на входе по воздуху с окружающей средой, на выходе по обогащенному кислородом воздуху - с входом ВП котла по воздуху.

Включение в схему котла БП, осуществляющего предварительный подогрев  $\text{CO}_2$  в.д. параллельно с первой (высокотемпературной) ступенью рекуператора с

возможностью регулирования подачи  $\text{CO}_2$  в.д. в БП по условию равенства температур  $\text{CO}_2$  в.д. на выходах байпасного подогревателя и рекуператора по  $\text{CO}_2$  в.д. позволяет снизить температуру дымовых газов перед ВП котла и одновременно повысить температуру  $\text{CO}_2$  в.д. на входе в перегреватель  $\text{CO}_2$  в.д. котла, т.е. снизить потребный расход тепла в ВП котла (в обеспечение снижения температуры уходящих газов и повышения КПД котла) и увеличить температурный средний напор в ВП котла с минимальным снижением КПД цикла и тем самым повысить КПД  $\text{CO}_2$ -ЭУ по сравнению с прототипом.

Включение в схему котла жидкостного подогревателя топлива, осуществляющего подогрев топлива теплом дымовых газов за БП, позволяет дополнительно снизить потребный расход тепла в ВП котла, а размещение поверхностей нагрева газожидкостного теплообменника в газовом тракте котла в рассечку поверхностей нагрева газового воздухоподогревателя позволяет дополнительно увеличить средний температурный напоры в газовом ВП и снизить его металлоемкость.

Применение ВРУ позволяет повысить компактность ВП котла и котла в целом, снизить потери тепла с уходящими газами и дополнительно снизить потребный расход тепла на нагрев воздуха. Наиболее эффективно применение ВРУ при наличии жидкостного подогревателя топлива, поскольку повышает долю тепла дымовых газов за перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д., расходуемого на подогрев топлива, и позволяет не только снизить расход тепла в ВП котла, но и снизить расход тепла в БП 10 с соответствующим повышением КПД цикла и  $\text{CO}_2$ -ЭУ в целом.

В ходе проведенного анализа уровня техники, включающего поиск по патентным и научно-исследовательским источникам информации, а также выявление других источников, содержащих сведения об аналогах заявляемого изобретения, технического решения, характеризующегося признаками, тождественными (эквивалентными) признакам заявляемого изобретения, не обнаружено, при этом изобретение не вытекает явным для специалиста образом из известного уровня техники.

Сущность изобретения поясняется схематическими чертежами, представленными на фиг. 1 и 2. На фиг. 1 схематически изображена котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ с ВП котла в виде газового рекуперативного ВП, на фиг. 2 - котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ с жидкостным подогревателем топлива, газожидкостным теплообменником, установленным в рассечку ВП котла, и воздухоразделительной установкой.

Котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ, представленная на фиг. 1 и 2, содержит котел 1 с перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д. 2, турбину 3, состоящую из двух турбин высокого и низкого давления (ТВД и ТНД) 3а и 3б, сообщенную на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. выходом перегревателя котла  $\text{CO}_2$  в.д. 2 по  $\text{CO}_2$  в.д., рекуператор 4, состоящий из двух ступеней - высокотемпературного рекуператора (ВТР) 4а и низкотемпературного рекуператора (НТР) 4б, сообщенный на выходе по нагреваемому  $\text{CO}_2$  в.д. с входом перегревателя котла 2 по  $\text{CO}_2$  в.д., на входе по греющему теплоносителю - с выходом по  $\text{CO}_2$  н.д. последней по ходу рабочего тела турбины - ТНД 3б, охладитель 5, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом последней по ходу греющего теплоносителя ступени рекуператора по  $\text{CO}_2$  н.д. (НТР 4б), и компрессор 6, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом охладителя 5 по  $\text{CO}_2$  н.д., на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с входом последней по ходу  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора (НТР 4б) по  $\text{CO}_2$  в.д. В данном примере, как и в

прототипе, котел 1 содержит также промежуточный перегреватель  $\text{CO}_2$  среднего давления ( $\text{CO}_2$  с.д.) 7, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  с выходом ТВД 3а по  $\text{CO}_2$ , на выходе по  $\text{CO}_2$  - с входом ТНД 3б по  $\text{CO}_2$ , а котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ содержит также  
5 рекомпрессор 8, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом НТР 4б по  $\text{CO}_2$  н.д., на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с входом ВТР 4а по  $\text{CO}_2$  в.д., и турбогенератор 9.

Согласно изобретению, котел 1 содержит БП 10, установленный в газовом тракте котла за перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д. 2 котла, сообщенный на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. с входом  
10 перегревателя 2 котла по  $\text{CO}_2$  в.д., на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с выходом второй по ходу греющего  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора (в данном примере - с выходом НТР 4б) по  $\text{CO}_2$  в.д., выполненный с возможностью регулирования подачи  $\text{CO}_2$  в.д. в БП 10 по условию равенства температур  $\text{CO}_2$  в.д. на выходах БП 10 и рекуператора 4 (ВТР 4а) по  $\text{CO}_2$  в.д.. - с регулирующим клапаном (РК) 11, установленном на линии подачи  $\text{CO}_2$   
15 в.д. из НТР 4б в БП 10, топку 12, работающую на газовом или жидком топливе, и ВП котла, установленный в газовом тракте котла за БП 10.

На фиг. 1 схематически изображена котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ с ВП котла, выполненным, согласно п. 2 формулы, в виде газового рекуперативного ВП 13,  
20 установленного в газовом тракте котла за БП 10 и снабженного в данном примере электроприводной воздуходувкой 14 с частотным преобразователем.

На фиг. 2 схематически изображена котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ с жидкостным подогревателем топлива 15, газожидкостным теплообменником 17, установленным в  
25 рассечку ВП котла, согласно п. 3 формулы.. В приведенном на фиг. 2 примере ВП котла выполнен двухступенчатым, состоящим из высокотемпературной и низкотемпературной ступеней 3 и 16, поверхности теплообмена газожидкостного теплообменника 17 размещены в газовом тракте котла между ступенями ВП котла. Согласно п. 4 формулы, котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ снабжена также ВРУ 19, сообщенной на входе по воздуху с  
30 окружающей средой, на выходе по обогащенному кислородом воздуху - с входом ВП котла (его низкотемпературной ступени 16) по воздуху.

Котлотурбинная  $\text{CO}_2$ -ЭУ работает следующим образом.

В обоих приведенных на фиг. 1 и 2 вариантах котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ нагретый в  
35 перегревателе котла 2  $\text{CO}_2$  в.д. подают в ТВД 3а, где он расширяется до среднего давления с понижением температуры, затем  $\text{CO}_2$  с.д. подают в промежуточный перегреватель 7, где вновь нагревают до начальной температуры и подают в ТНД 3б, где  $\text{CO}_2$  расширяется до низкого давления. Турбины ТВД 3а и ТНД 3б совершают  
40 работу по приводу турбогенератора 9, компрессора 6 и рекомпрессора 8. Из ТНД 3б  $\text{CO}_2$  н.д. подают на вход рекуператора 4 (его высокотемпературной ступени ВТР 4а) по греющему теплоносителю, где  $\text{CO}_2$  н.д. охлаждается, отдавая свое тепло углекислому газу в.д., сначала в ВТР 4а, затем в низкотемпературной ступени рекуператора НТР  
4б. Охлажденный в рекуператоре 4  $\text{CO}_2$  н.д. разделяют на два потока: первый поток подают в рекомпрессор 8, где сжимают до высокого давления и подают на вход ВТР  
45 4а по нагреваемому  $\text{CO}_2$  в.д., второй поток подают в охладитель 5, охлаждают до минимально возможной температуры и подают в компрессор 6, сжимают до высокого давления и подают на вход НТР 4б по  $\text{CO}_2$  в.д., где нагревают до температуры, примерно равной или чуть превосходящей температуру  $\text{CO}_2$  в.д. за рекомпрессором 8. Малый

прирост температуры  $\text{CO}_2$  в процессе его сжатия в компрессоре и возможность охлаждения  $\text{CO}_2$  н.д. с минимальными температурными напорами на концах НТР 4б при расходе  $\text{CO}_2$  н.д., превышающем расход  $\text{CO}_2$  в.д. на величину отбора  $\text{CO}_2$  н.д. в рекомпрессор, обусловлены значительным повышением теплоемкости  $s\text{CO}_2$  с повышением его давления при достаточно низких температурах. По мере нагрева  $\text{CO}_2$  в.д. в ВТР 4а его теплоемкость снижается, но все же остается более высокой, чем теплоемкость греющего  $\text{CO}_2$  н.д., что позволяет произвести отбор части расхода  $\text{CO}_2$  в.д. из НТР 4б в обход ВТР 4а на подогрев в БП 10, сохраняя величину среднего температурного напора в ВТР 4а на приемлемом (заданном) уровне.

В обоих приведенных на фиг. 1 и 2 примерах реализации заявляемой котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ в БП 10 подают  $\text{CO}_2$  в.д. с регулированием по условию поддержания температур  $\text{CO}_2$  в.д. на выходах БП 10 и ВТР 4а на одинаковом уровне. Величина расхода  $\text{CO}_2$  в.д. в БП 10, определенная по заданной величине среднего температурного напора в ВТР 4а, оказывается достаточной для снижения температуры газа перед ВП котла и расхода тепла в ВП до приемлемого уровня, в том числе и в простейшем варианте заявляемой котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ, схематически изображенном на фиг. 1.

Дополнительное снижение потребного расхода тепла в ВП котла достигается за счет отвода части тепла дымовых газов за БП на подогрев топлива, а также за счет уменьшения расхода дымовых газов и расхода нагреваемого в ВП котла воздуха при помощи ВРУ 19 при сохранении расхода тепла на подогрев топлива и, возможно, расхода тепла в БП 10 на неизменном уровне.

В котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ, приведенной на фиг. 2, атмосферный воздух подают воздухоподувкой 14 в ВРУ 19, в данном примере являющейся ВРУ мембранного типа, осуществляющей разделение воздуха на газ, состоящий, в основном, из азота, и на обогащенный кислородом воздух. Азот отводят в окружающую среду, а обогащенный кислородом остаток воздуха подают в ВП котла - в его вторую (по ходу дымовых газов) ступень 16 и далее, в первую ступень 3, затем - на входы топки 12 по воздуху. Подвод тепла дымовых газов за БП 10 на подогрев топлива осуществляют через промежуточный жидкий теплоноситель (например, диатермическое масло или воду высокого давления), циркуляцию которого через газожидкостный теплообменник 17 и жидкостный подогреватель топлива 15 обеспечивают электронасосом с частотным преобразователем 18, при помощи которого регулируют расход жидкого теплоносителя, например, по условию поддержания температурного напора на горячем конце газожидкостного теплообменника 17 на требуемом (расчетном) уровне..

Применение ВРУ 19 позволяет повысить компактность ВП котла и котла в целом, снизить потери тепла с уходящими газами и дополнительно снизить потребный расход тепла на нагрев воздуха в обеспечение заданного КПД котла (заданной температуры уходящих из котла газов). Наиболее эффективно применение ВРУ при наличии жидкостного подогревателя топлива 15, поскольку повышает долю тепла дымовых газов за перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д., расходуемого на подогрев топлива, и позволяет не только снизить расход тепла в ВП котла, но и снизить расход тепла в БП 10 с соответствующим повышением КПД цикла и  $\text{CO}_2$ -ЭУ в целом.

Приведенные на фиг. 1 и 2 примеры представлены для иллюстрации заявляемого изобретения с применением отличительных признаков по всем пунктам формулы и не исчерпывает всех возможных вариантов его реализации, которые могут отличаться

числом турбин, рекуператоров, охладителей  $\text{CO}_2$ , компрессоров и рекомпрессоров, промежуточных перегревателей. Изобретение применимо как в котлотурбинных  $\text{CO}_2$ -ЭУ с одной турбиной без использования промперегрева, так и с тремя и более турбинами и с двумя и более промежуточными перегревателями. Рекуператор может состоять не из двух, а, например, из трех ступеней. Компрессор может быть выполнен двухкаскадным, с промежуточным охладителем  $\text{CO}_2$ . Рекомпрессор также может быть выполнен двухкаскадным, с промежуточным охладителем, сообщенным на входе по охлаждающему теплоносителю с выходом компрессора по  $\text{CO}_2$  в.д., либо вообще отсутствовать. Исполнение ВП котла и жидкостного подогревателя топлива, установленного в рассечку ВП котла, также может быть различным. Газовый ВП может быть выполнен не двух, а трехступенчатым, и т.д. В варианте с ВРУ и жидкостным подогревателем топлива ВП котла может быть выполнен в виде ВП с промежуточным жидким теплоносителем, содержащим жидкостный подогреватель воздуха, сообщенный на входе по воздуху с выходом ВРУ по обогащенному кислородом воздуху, на выходе по воздуху - с входами топки 12 по воздуху, и газожидкостный теплообменник, размещенный в газовом тракте за БП 10 и сообщенный на входе и выходе по жидкому промежуточному теплоносителю, соответственно, с выходами и входами жидкостных подогревателей воздуха и топлива.

В любом из перечисленных вариантов применения заявляемого изобретения обеспечивает достижение заявленного технического результата и повышение КПД котла и котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ в целом или снижение металлоемкости ВП котла без снижения КПД котлотурбинной  $\text{CO}_2$ -ЭУ.

#### (57) Формула изобретения

1. Котлотурбинная диоксид-углеродная энергоустановка, содержащая котел с перегревателем углекислого газа высокого давления ( $\text{CO}_2$  в.д.), по крайней мере одну турбину, сообщенную на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. с выходом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., рекуператор, состоящий из двух или более ступеней, сообщенный на выходе по нагреваемому  $\text{CO}_2$  в.д. с входом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., на входе по греющему углекислому газу низкого давления ( $\text{CO}_2$  н.д.) - с выходом последней по ходу рабочего тела турбины по  $\text{CO}_2$  н.д., охладитель, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом по  $\text{CO}_2$  н.д. последней по ходу  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора, и компрессор, сообщенный на входе по  $\text{CO}_2$  н.д. с выходом охладителя по  $\text{CO}_2$  н.д., на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с входом последней по ходу  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора по  $\text{CO}_2$  в.д., отличающаяся тем, что котел содержит байпасный подогреватель  $\text{CO}_2$  в.д., установленный в газовом тракте котла за перегревателем  $\text{CO}_2$  в.д. котла, сообщенный на выходе по  $\text{CO}_2$  в.д. со входом перегревателя котла по  $\text{CO}_2$  в.д., на входе по  $\text{CO}_2$  в.д. - с выходом по  $\text{CO}_2$  в.д. второй по ходу греющего  $\text{CO}_2$  н.д. ступени рекуператора, и выполненный с возможностью регулирования подачи  $\text{CO}_2$  в.д. в байпасный подогреватель по условию равенства температур  $\text{CO}_2$  в.д. на выходах байпасного подогревателя и рекуператора по  $\text{CO}_2$  в.д., топку, работающую на газовом топливе, и воздухоподогреватель котла, установленный в газовом тракте котла за байпасным подогревателем  $\text{CO}_2$  в.д.

2. Котлотурбинная диоксид-углеродная энергоустановка по п. 1, отличающаяся тем, что воздухоподогреватель котла выполнен в виде рекуперативного или регенеративного

газового воздухоподогревателя.

3. Котлотурбинная диоксид-углеродная энергоустановка по п. 2, отличающаяся тем, что содержит жидкостный подогреватель топлива и газожидкостный теплообменник, сообщенный на входе и выходе по нагреваемой жидкости соответственно с выходом и входом жидкостного подогревателя топлива по греющей жидкости, при этом поверхности нагрева газожидкостного теплообменника установлены в газовом тракте котла в рассечку поверхностей нагрева газового воздухоподогревателя по ходу дымовых газов.

4. Котлотурбинная диоксид-углеродная энергоустановка по п. 1, отличающаяся тем, что содержит воздухоразделительную установку, сообщенную на входе по воздуху с окружающей средой, на выходе по обогащенному кислородом воздуху - с входом по воздуху воздухоподогревателя котла.

15

20

25

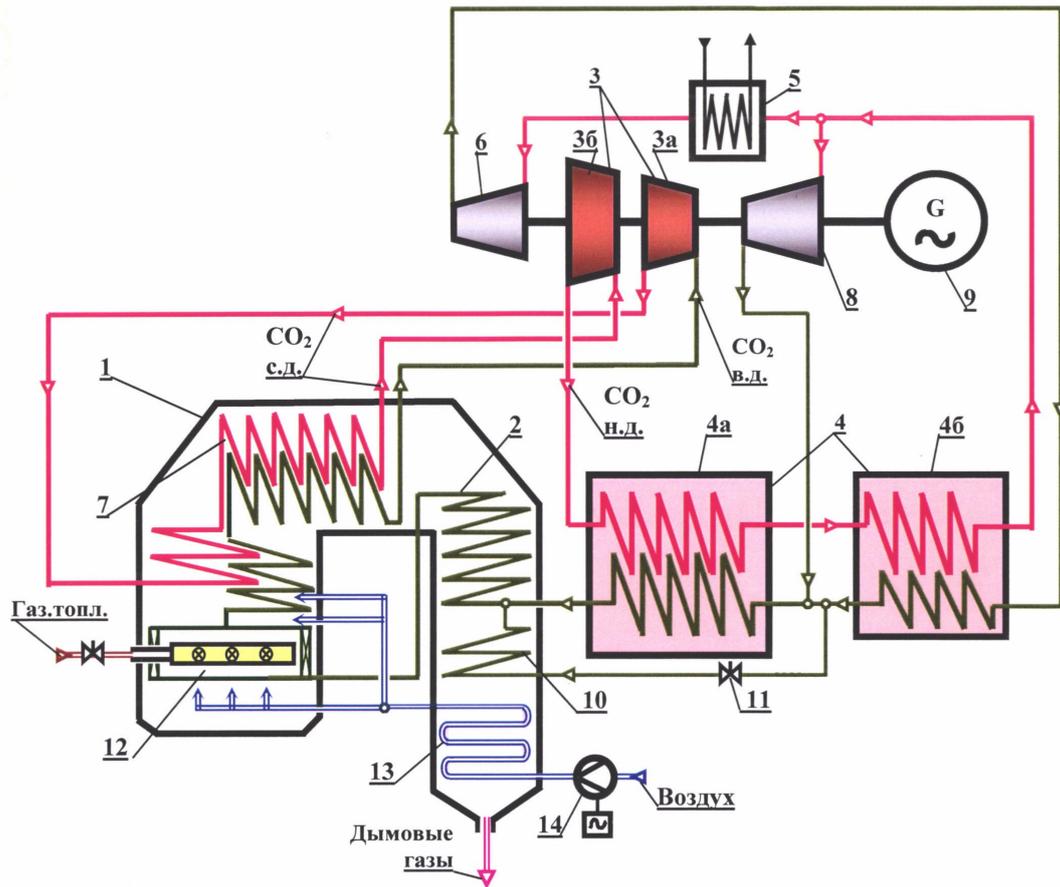
30

35

40

45

1



Фиг.1

2

