

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **036299**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.10.23

(21) Номер заявки
201890631

(22) Дата подачи заявки
2016.08.31

(51) Int. Cl. **F01K 23/10** (2006.01)
F01K 25/10 (2006.01)
F02C 3/34 (2006.01)
F02C 1/00 (2006.01)
F02C 6/02 (2006.01)

(54) **СИСТЕМА И СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕСКОЛЬКИХ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЦИКЛОВ**

(31) **62/212,749**

(32) **2015.09.01**

(33) **US**

(43) **2018.09.28**

(86) **PCT/US2016/049667**

(87) **WO 2017/040635 2017.03.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
8 РИВЕРЗ КЭПИТЛ, ЛЛК (US)

(72) Изобретатель:
**Аллам Родни Джон (GB), Форрест
Брок Алан (US)**

(74) Представитель:
**Веселицкая И.А., Веселицкий М.Б.,
Кузенкова Н.В., Каксис Р.А., Белоусов
Ю.В., Куликов А.В., Кузнецова Е.В.,
Соколов Р.А., Кузнецова Т.В. (RU)**

(56) **WO-A1-2012128928
WO-A2-2012128926
WO-A1-2012003077**

(57) Изобретение относится к системам и способам генерации мощности. В частности, цикл генерации мощности, в котором CO₂ используется в качестве рабочего тела, может быть объединен со вторым циклом, в котором сжатый CO₂ поток из первого цикла генерации мощности может нагреваться и расширяться для выработки дополнительной энергии и обеспечения дополнительного нагрева в указанном ранее цикле генерации мощности.

B1**036299****036299****B1**

Область техники

Настоящее изобретение относится к системам и способам генерации мощности, в которых может быть повышена эффективность цикла генерации мощности, использующего циркулирующую текучую среду на основе CO_2 . В частности, поток сжатого CO_2 из цикла генерации мощности может нагреваться от независимого источника и расширяться, производя дополнительную мощность и обеспечивая дополнительный нагрев для цикла генерации мощности.

Уровень техники

Наиболее распространенный в настоящее время цикл генерации мощности с использованием природного газа включает газовую турбину в сочетании с парогенератором-рекуператором. Такая система может быть отнесена к комбинированному циклу на сжигании природного газа, в котором в усовершенствованной системе генерации мощности, работающей по паровому циклу Ренкина (парогенератор-рекуператор плюс паровая турбина), используется тепло горячих турбинных выхлопов для получения пара с целью дополнительной генерации мощности. Использование блока, работающего по комбинированному циклу на природном газе, обычно считается эффективным способом генерации мощности на таком топливе. При работе такого блока весь CO_2 , водяные пары и оксиды азота (NO_x), полученные при горении, выбрасываются в атмосферу.

Было показано, что использование CO_2 (особенно в сверхкритической форме) в качестве рабочего тела является высокоэффективным способом генерации мощности. См., например, патент US 8596075 на имя Allam и др., содержание которого в полном объеме включено в данное описание в качестве ссылки, и в котором раскрывается использование непосредственно нагретого рабочего тела на основе CO_2 в системе генерации мощности, действующей по кислородно-топливному рекуперативному циклу Брайтона практически с нулевыми выбросами любых потоков в атмосферу. Ранее предлагалось применение CO_2 в качестве рабочего тела в замкнутом цикле, в котором CO_2 многократно сжимается и расширяется для генерации мощности с промежуточным нагревом с использованием побочного источника тепла и одного или нескольких теплообменников. См., например, патент US 8783034 на имя Held.

Для повышения эффективности таких способов генерации мощности привлекались различные средства. Например, производилась оптимизация работы рекуперативного теплообменника путем сжатия горячего газа или использования внешних источников нагрева. Оптимизация CO_2 циклов в основном фокусировалась на достижении максимальной выходной мощности турбины. Несмотря на такие попытки в данной области сохраняется потребность в системах и способах генерации мощности с повышенной эффективностью и выходной мощностью при одновременном ограничении или в основном исключении выброса любых потоков (например, CO_2 , NO_x и других связанных с горением продуктов) в атмосферу.

Сущность изобретения

Настоящее изобретение относится к системам и способам генерации мощности, в которых эффективность цикла генерации мощности с использованием CO_2 в качестве рабочего потока может быть максимизирована при одновременном увеличении генерируемой мощности без необходимости в существенных изменениях оборудования, задействованного в цикле генерации мощности. Повышение эффективности может быть осуществлено путем дополнительного нагрева потока рабочего тела сверх нагрева, достижимого за счет рекуперации при внутреннем теплообмене, при этом дополнительный нагрев обеспечивается внешним источником тепла, независимым от цикла генерации мощности. В частности, независимый источник тепла может использоваться для нагрева по меньшей мере части рециркуляционного CO_2 потока высокого давления, поступающей из цикла генерации мощности, и нагретый таким образом поток может различными способами возвращаться в цикл генерации мощности, обеспечивая дополнительный нагрев рециркуляционного рабочего CO_2 потока. Предпочтительно нагретый таким образом рециркуляционный CO_2 поток может расширяться для выработки дополнительной мощности и для приведения нагретого таким образом рециркуляционного CO_2 потока в состояние, пригодное для возвращения в основной цикл генерации мощности под давлением, при котором не требуется введения дополнительного оборудования.

Таким образом в некоторых вариантах выполнения настоящее изобретение обеспечивает способ генерации мощности, включающий первый цикл генерации мощности, в котором рециркуляционный CO_2 поток подвергается многократному (повторяющемуся) сжатию, нагреву, вовлечению в цикл горения, расширению для выработки мощности и охлаждению; и второй цикл генерации мощности, в котором сжатый CO_2 из первого цикла генерации мощности нагревается от источника тепла, независимого от первого цикла генерации мощности, расширяется для выработки мощности и воссоединяется/рекомбинирует с рециркуляционным CO_2 потоком в первом цикле генерации мощности. В частности, нагрев, производимый в первом цикле генерации мощности выше по потоку стадии горения, может включать привлечение тепла, сообщенного сжатому рециркуляционному CO_2 во втором цикле генерации мощности. Например, нагрев в первом цикле генерации мощности может включать пропускание рециркуляционного CO_2 потока через рекуперативный теплообменник во взаимодействии с охлаждающимся выхлопным потоком турбины, и сжатый CO_2 поток, нагретый во втором цикле генерации мощности, может пропускаться через рекуперативный теплообменник (или через его определенную часть или блок) для сообщения дополнительного нагрева рециркуляционному CO_2 потоку в первом цикле генерации

мощности. В другом, не служащем ограничением примере первый цикл генерации мощности может включать вспомогательный теплообменник, и сжатый CO_2 поток, нагретый во втором цикле генерации мощности, может пропускаться через вспомогательный теплообменник во взаимодействии с частью рециркуляционного CO_2 потока в первом цикле генерации мощности и затем эта часть может рекомбинировать с остальной частью рециркуляционного CO_2 потока перед, во время или после пропускания через рекуперативный теплообменник.

Источник тепла во втором цикле генерации мощности может содержать любое устройство или комбинацию устройств, выполненных так, чтобы сообщенное потоку тепло было достаточным для получения сжатым CO_2 потоком требуемого в соответствии с приведенным описанием количества тепла с нужными свойствами. В качестве не служащего ограничением примера источник тепла во втором цикле генерации мощности может представлять собой один или несколько компонентов из группы, включающей источник, использующий тепло горения, источник тепла, работающий на солнечной энергии, ядерный источник тепла, геотермальный источник тепла и источник сбросового промышленного тепла. Источник тепла может содержать теплообменник, тепловой насос, устройство генерации мощности и любое сочетание различных элементов (например, трубопроводы и т.п.), способных формировать, обеспечивать или доставлять необходимое тепло.

В другом иллюстративном варианте способ генерации мощности согласно настоящему изобретению может включать выполнение первого цикла, включающего: расширение рабочего потока, содержащего рециркуляционный CO_2 , в первой турбине для выработки первой части мощности; отбор тепла от рабочего потока в рекуперативном теплообменнике; сжатие рабочего потока; повторный нагрев рабочего потока с использованием отобранного тепла в рекуперативном теплообменнике; и перегрев сжатого рабочего потока в камере сгорания. Способ может также включать выполнение вложенного цикла, в котором сжатый рабочий поток из первого цикла нагревается от источника тепла, независимого от камеры сгорания рекуперативного теплообменника, и расширяется во второй турбине для получения второй части мощности. В частности, расширенный рабочий поток из вложенного цикла после сжатия и перед перегревом может использоваться для дополнительного нагрева рабочего потока в первом цикле.

В других вариантах выполнения настоящее изобретение может обеспечивать способы повышения эффективности цикла генерации мощности. В не служащем ограничением варианте такой способ может включать действие цикла генерации мощности таким образом, чтобы сжатый, рециркуляционный CO_2 пропускаться через камеру сгорания, в которой углеродсодержащее топливо сжигается в присутствии окислителя для получения выходного потока, содержащего рециркуляционный CO_2 ; выходной поток расширялся в турбине для генерации мощности и формирования выхлопного потока турбины, содержащего рециркуляционный CO_2 ; выхлопной поток турбины охлаждался в рекуперативном теплообменнике; охлажденный выхлопной поток турбины пропускаться через сепаратор для отделения рециркуляционного CO_2 ; рециркуляционный CO_2 сжимался; и сжатый рециркуляционный CO_2 нагревался при пропускании через рекуперативный теплообменник от выхлопного потока турбины. Такой способ может также включать добавление дополнительного нагрева сжатого, рециркуляционного CO_2 выше уровня нагрева, достижимого от выхлопного потока турбины, при этом дополнительный нагрев обеспечивается за счет отвода части сжатого рециркуляционного CO_2 , нагрева отведенной части сжатого рециркуляционного CO_2 от источника тепла, независимого от цикла генерации мощности, и передачи тепла от отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 остальной части сжатого рециркуляционного CO_2 в цикле генерации мощности. Более конкретно, такой способ может включать пропускание отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 через рекуперативный теплообменник, так чтобы в нем передать тепло сжатому рециркуляционному CO_2 . Альтернативно или дополнительно такой способ может включать пропускание отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 через второй теплообменник для нагрева рециркуляционного бокового CO_2 потока, который затем воссоединяется с остальной частью сжатого рециркуляционного CO_2 в рекуперативном теплообменнике. В некоторых вариантах выполнения такой способ может включать расширение отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 потока во второй турбине для генерации мощности.

В одном или нескольких вариантах выполнения способ может включать действие первого цикла генерации мощности, в котором рабочий CO_2 поток подвергается многократному расширению для выработки мощности, охлаждению, сжатию, нагреву и вовлечению в цикл горения; и действие второго цикла генерации мощности, в котором по меньшей мере часть сжатого рабочего CO_2 потока из первого цикла генерации мощности нагревается от источника тепла, независимого от первого цикла генерации мощности, расширяется для выработки мощности и воссоединяется с рабочим CO_2 потоком в первом цикле генерации мощности. В частности, такой способ генерации мощности может отличаться тем, что к нему может быть применено одно или несколько из следующих положений: расширение для генерации мощности включает расширение рабочего CO_2 потока в первой турбине с выработкой первой части мощности; охлаждение включает отбор тепла от рабочего CO_2 потока в рекуперативном теплообменнике; сжатие включает сжатие рабочего CO_2 потока по меньшей мере одним компрессором; нагрев включает нагрев рабочего CO_2 потока с использованием тепла, отобранного в рекуперативном теплообменнике; участие в процессе горения включает перегрев сжатого рабочего CO_2 потока в камере сгорания. В добавле-

ние к вышесказанному способ генерации мощности может быть определен тем, что может применяться любое одно или несколько из следующих положений: нагрев в первом цикле генерации мощности включает получение тепла, сообщенного рабочему CO_2 потоку во втором цикле генерации мощности; источник тепла во втором цикле генерации мощности представляет собой один или несколько компонентов из группы, включающей: источник, использующий тепло горения, источник тепла, работающий на солнечной энергии, ядерный источник тепла, геотермальный источник тепла и источник сбросового промышленного тепла; расширенный рабочий поток из второго цикла генерации мощности используется для добавления тепла рабочему CO_2 потоку в первом цикле генерации мощности после сжатия и перед участием в процесс горения.

И еще, генерация мощности может определяться тем, что рабочий CO_2 поток из второго цикла генерации мощности, который воссоединяется с рабочим потоком в первом цикле генерации мощности, представляет собой один или несколько компонентов из группы, содержащей входной поток после охлаждения и перед сжатием в первом цикле генерации мощности; входной поток после сжатия и перед нагревом; входной поток в процессе нагрева в первом цикле генерации мощности.

В других вариантах выполнения настоящее изобретение может также обеспечивать системы генерации мощности. В частных вариантах выполнения система генерации мощности может содержать компрессор, выполненный с возможностью сжатия CO_2 потока до давления по меньшей мере 100 бар (10 МПа); камеру сгорания, размещенную ниже по потоку от компрессора; первую турбину ниже по потоку от камеры сгорания и выше по потоку от компрессора; первый теплообменник, установленный так, чтобы принимать поток из компрессора и принимать отдельный поток из турбины, и выполненный с возможностью передачи тепла между потоками; вторую турбину ниже по потоку от компрессора; и второй теплообменник, установленный так, чтобы принимать поток от компрессора и принимать отдельный поток от источника тепла.

В некоторых вариантах выполнения внешний источник тепла (например, газовая турбина) может быть интегрирован с энергосистемой, в которой CO_2 используется в качестве рабочего тела. В некоторых вариантах выполнения поток, полученный от внешнего источника тепла (например, выхлопной поток газовой турбины), может охлаждаться, нагревая CO_2 поток высокого давления. Опционально, поток, полученный от внешнего источника тепла, может дополнительно нагреваться при горении углеводородсодержащего топлива. В некоторых вариантах выполнения рециркуляционный CO_2 поток высокого давления, нагретый от внешнего источника тепла, может расширяться в генерирующей мощности турбине. Выхлопной поток турбины может быть сконфигурирован так, чтобы давление в нем соответствовало входному, промежуточному или выходному давлению рециркуляционного CO_2 компрессора в автономном цикле генерации мощности (например, в цикле Аллама, описанном в примере), в то время как входное давление турбины может соответствовать выходному давлению CO_2 насоса в автономном цикле генерации мощности. В некоторых вариантах выполнения рециркуляционный CO_2 поток высокого давления, нагретый от внешнего источника тепла, может иметь температуру приблизительно от 400 до приблизительно 1500°C, предпочтительно приблизительно от 700 до приблизительно 1300°C. Обеспечение нагрева в таком температурном диапазоне может быть особо предпочтительным для реализации описанных усовершенствований.

В других вариантах выполнения выхлопной поток вспомогательной турбины с повышенной температурой может использоваться для обеспечения дополнительного тепла, требуемого для нагрева CO_2 в температурном диапазоне от окружающей среды до 500°C, в связи с намного более высокой удельной теплоемкостью CO_2 в диапазоне давлений приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа) по сравнению с удельной теплоемкостью при температурах выше 500°C. Такое добавление тепла в низкотемпературном диапазоне может быть, в частности, получено от тепла, сообщенного рециркуляционному CO_2 потоку высокого давления, как здесь описано. Хотя добавление тепла в низкотемпературном диапазоне может быть полезным для повышения эффективности цикла горения, это добавление тепла в низкотемпературном диапазоне не обязательно должно комбинироваться с добавлением тепла в более высоком температурном диапазоне. При необходимости, в дополнительном нагреве рециркуляционных CO_2 потоков в температурном диапазоне ниже 250°C может предпочтительно использоваться тепло, полученное от работающего в адиабатическом режиме главного воздушного компрессора установки криогенного разделения воздуха, обеспечивающей кислород, требуемый для системы.

Раскрытые системы и способы в некоторых вариантах выполнения имеют преимущество в том, что обеспечивают возможность объединения систем, так чтобы один или несколько компонентов оборудования могли использоваться совместно. Такое объединение может предоставить несколько преимуществ, включая обеспечение повышенной выработки энергии и обеспечение снижения капитальных затрат на увеличенную мощность в кВт. Кроме того, такие объединения не обязательно ограничены определенными перекрывающимися температурными диапазонами работы. Напротив, система, действующая в любом температурном диапазоне, может с большой пользой объединяться с циклом генерации мощности, в котором в качестве рабочего потока используется CO_2 (как в общем здесь описано), и тем самым достигать описанных усовершенствований.

Краткое описание чертежей

Далее изобретение рассмотрено со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых показано:
на фиг. 1 - блок-схема иллюстративных системы и способа генерации мощности согласно настоящему изобретению;

на фиг. 2 - блок-схема системы и способа генерации мощности, объединяющая газовую турбину и CO_2 цикл согласно иллюстративным вариантам выполнения изобретения.

Подробное описание осуществления изобретения

Изложенная сущность изобретения далее будет описана более полно со ссылкой на иллюстративные варианты его осуществления. Эти варианты выполнения представлены так, чтобы данное описание было законченным и исчерпывающим, полностью раскрывая объем изобретения специалисту в данной области техники. Действительно, сущность изобретения может быть реализована во многих различных вариантах и не должна рассматриваться как ограниченная приведенными ниже вариантами выполнения, тем более что эти варианты представлены так, чтобы данное описание удовлетворяло всем действующим нормативным требованиям. В приведенном описании и в приложенной формуле изобретения использование форм единственного числа включает множественность объектов до тех пор, пока не оговорено иное.

Настоящее изобретение обеспечивает системы и способы, в которых первый цикл генерации мощности, использующий CO_2 в качестве рабочего потока, может быть объединен со вторым или вложенным циклом генерации мощности, в котором по меньшей мере часть того же рабочего CO_2 потока может дополнительно обрабатываться с генерацией в результате дополнительной мощности и (или) выработкой тепла. В таких системах и способах может быть достигнута высокая эффективность, в частности может быть улучшен рекуперативный теплообмен в первом цикле генерации мощности при одновременной выработке дополнительной мощности. Дополнительные действия во втором цикле генерации мощности могут включать нагрев от источника тепла, независимого от поступления тепла в первом цикле генерации мощности. Сочетание второго цикла генерации мощности с первым циклом генерации мощности может иметь то преимущество, по меньшей мере частичное, что один или несколько узлов оборудования могут использоваться в обоих циклах. Например, компрессор, используемый в первом цикле генерации мощности, может также использоваться как компрессор во втором цикле генерации мощности. Поэтому настоящее изобретение может отличаться сочетанием по меньшей мере одного CO_2 потока с прямым подогревом и по меньшей мере одного опосредованно нагретого CO_2 потока, для которых совместно используется одна турбинная установка для обеспечения преимущества, заключающегося, по меньшей мере, в повышении выходной мощности при одновременной оптимизации конструкции рекуперативного теплообменника. В некоторых вариантах выполнения опосредованно нагреваемый CO_2 поток включает по меньшей мере часть CO_2 из потока с прямым подогревом. Соответственно единый рециркуляционный CO_2 поток может подвергаться сжатию для формирования потока высокого давления, разделяться на поток с опосредованным подогревом и поток с прямым подогревом и затем снова объединяться после соответствующих стадий нагрева. Альтернативно, единый рециркуляционный CO_2 поток может сжиматься для формирования потока высокого давления, часть рециркуляционного CO_2 потока высокого давления может опосредованно нагреваться, и этот опосредованно нагретый CO_2 поток может объединяться с оставшейся частью рециркуляционного CO_2 потока для формирования общего рециркуляционного CO_2 потока, подвергаемого непосредственному нагреву.

В некоторых вариантах выполнения поток высокого давления из первого цикла генерации мощности (например, рециркуляционный CO_2 поток высокого давления) может нагреваться независимым источником тепла во втором цикле генерации мощности. Нагретый поток может затем подаваться в устройство расширения, выполненное с возможностью генерации мощности. После этого расширенный поток может поступать обратно в первый цикл генерации мощности, что предпочтительно может создавать дополнительный нагрев в первом цикле генерации мощности сверх рекуперативного нагрева от охлаждающегося выхлопного потока турбины. Давление на выходе устройства расширения во втором цикле генерации мощности может быть подобрано таким образом, чтобы расширенный поток мог вводиться в первый цикл генерации мощности под соответствующим давлением в точке введения. Такой дополнительный нагрев в первом цикле генерации мощности может производиться различными способами. Например, расширенный поток из второго цикла генерации мощности может использоваться (частично или полностью) непосредственно как поток нагрева в рекуперативном теплообменнике, в котором рециркуляционный CO_2 поток высокого давления повторно нагревается перед вводом в камеру сгорания в первом цикле генерации мощности. Альтернативно расширенный поток из второго цикла генерации мощности может использоваться опосредованно - например, как поток нагрева в дополнительном теплообменнике, при этом для использования в качестве потока нагрева в рекуперативном теплообменнике нагревается отдельный поток.

Цикл генерации мощности, используемый как первый цикл генерации мощности, согласно настоящему изобретению может включать любую систему и способ, в которых в рабочем потоке используется CO_2 (в частности, сверхкритический CO_2 или sCO_2). Как не служащий ограничением пример можно привести в полном объеме введенный в данное описание в качестве ссылки патент US 8596075 на имя Allam

и др., в котором описываются система и способ, в которых рециркуляционный CO_2 поток нагревается напрямую и используется в генерации мощности. В частности, рециркуляционный CO_2 поток, сформированный при высокой температуре и высоком давлении, подается в камеру сгорания, в которой углеродосодержащее топливо сжигается в атмосфере кислорода, расширяется в турбине, вырабатывая мощность, охлаждается в теплообменнике, очищается для удаления воды и других примесей, сжимается, нагревается повторно с использованием тепла, отобранного от турбинных выхлопов, и снова направляется в камеру сгорания, повторяя цикл. Такие система и способ обладают тем преимуществом, что все топливо и образовавшиеся при горении загрязняющие примеси, избыточный CO_2 и вода удаляются в виде жидкой или твердой фракции (например, пепла), и фактически отсутствует выброс в атмосферу каких-нибудь потоков. Эффективность системы и способа повышается, например, за счет подвода низкотемпературного тепла (то есть с температурой ниже 500°C) после повторного сжатия рециркуляционного CO_2 потока и перед камерой сгорания.

Цикл генерации мощности, используемый как первый цикл генерации мощности, может включать больше или меньше стадий, чем описано выше, и может в общем случае включать цикл, в котором рециркуляционный CO_2 поток высокого давления расширяется для выработки мощности и снова рециркулируется для дальнейшей генерации мощности. Применительно к данному описанию рециркуляционный CO_2 поток высокого давления может иметь давление по меньшей мере 100 бар (10 МПа), по меньшей мере 200 бар (20 МПа) или по меньшей мере 300 бар (30 МПа). В некоторых вариантах выполнения рециркуляционный CO_2 поток высокого давления может иметь давление приблизительно от 100 бар (10 МПа) до приблизительно 500 бар (50 МПа), приблизительно от 150 бар (15 МПа) до приблизительно 450 бар (45 МПа) или приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа). Соответственно при ссылке на рециркуляционный CO_2 поток высокого давления может иметься в виду CO_2 поток под давлением, лежащим в указанных диапазонах. Такие значения давлений относятся также к другим описанным потокам высокого давления, например к рабочему потоку высокого давления, содержащему CO_2 .

В некоторых вариантах выполнения способ генерации мощности согласно настоящему изобретению может включать сочетание первого цикла генерации мощности со вторым циклом генерации мощности. В частности первый цикл генерации мощности может представлять собой цикл, в котором рециркуляционный CO_2 поток подвергается повторному сжатию, нагреванию, участию в горении, расширению для выработки энергии и охлаждению. Второй цикл генерации мощности может быть циклом, в котором сжатый рециркуляционный CO_2 из первого цикла генерации мощности нагревается от источника тепла, не связанного с первым циклом генерации мощности, расширяется для генерации мощности и воссоединяется с рециркуляционным CO_2 потоком в первом цикле генерации мощности.

В качестве не служащего ограничением примера на фиг. 1 проиллюстрированы система 100 генерации мощности и способ ее использования. В данном случае первый цикл 110 генерации мощности включает камеру 115 сгорания, в которой подводимое углеродосодержащее топливо 112 и подводимый окислитель 114 сжигаются в присутствии рециркуляционного CO_2 потока 143, формируя высокотемпературный поток 117 продуктов горения, расширяющийся в турбине 120 для выработки мощности в генераторе 145.

Выхлопной высокотемпературный поток 122 из турбины 120 охлаждается в рекуперативном теплообменнике 125, создавая низкотемпературный CO_2 поток 127 низкого давления, который пропускается через сепаратор 130, на выходе из которого формируются конденсированные продукты 132 (например, вода) и в основном чистый рециркуляционный CO_2 поток. В основном чистый рециркуляционный CO_2 поток 133 сжимается в компрессоре 135 для формирования рециркуляционного CO_2 потока 137 высокого давления, который разделяется на рециркуляционный CO_2 поток 138 первой части и рециркуляционный CO_2 поток 151 второй части. Рециркуляционный CO_2 поток первой части направляется в рекуперативный теплообменник 125, в котором он нагревается от охлаждающегося выхлопного потока 122 турбины.

Второй цикл 150 генерации мощности включает источник 160 тепла, которым может быть, например, газовая турбина, вырабатывающая высокотемпературный выхлопной поток 162 высокого давления. Нагретый выхлопной поток 162 пропускается через теплообменник 155, в котором он охлаждается, нагревая рециркуляционный CO_2 поток 151 второй части, отведенный из первого цикла 110 генерации мощности. Хотя источник 160 тепла показан как один элемент, понятно, что может использоваться группа источников тепла. Например, могут использоваться две или несколько газовых турбин параллельно или комбинация различных типов источников тепла (например, газовая турбина в сочетании с источником сбросного тепла). Охлажденный поток 157 с выхода теплообменника 155 может быть, как показано, выведен в атмосферу. В других вариантах выполнения охлажденный поток может быть направлен на одну или несколько стадий обработки, и (или) охлажденный поток 157 может быть возвращен в источник 160 тепла для повторного нагревания.

Источником 160 тепла может быть любой источник, выполненный с возможностью обеспечения потока с достаточно высокой температурой. В частности, источник тепла может отличаться тем, что он независим от первого цикла генерации мощности. Независимым источником тепла может быть источник тепла, внешний по отношению к циклу генерации мощности и, следовательно, не принимающий участия

в этом цикле. Например, на фиг. 1 показана одна камера 115 сгорания. Можно представить, что введение второй камеры сгорания послужило бы дополнительным источником тепла, но не считалось бы внешним источником тепла или источником тепла, независимым от цикла генерации мощности, так как вторая камера сгорания непосредственно нагревала бы рециркуляционный поток и выработка тепла за счет горения непосредственно влияла бы на рабочие параметры других элементов цикла генерации мощности. Как видно на фиг. 1, источник 160 тепла независим от первого цикла 110 генерации мощности, так как рециркуляционный CO_2 поток никогда не нагревается непосредственно источником 160 тепла. Скорее источник 160 тепла обеспечивает нагрев, непосредственно добавляемый рециркуляционному CO_2 потоку противотоком, идущим через теплообменник 155. В качестве не служащих ограничением примеров независимых источников тепла, обеспечивающих опосредованный нагрев рециркуляционного CO_2 потока, могут быть один или несколько действующих на сжигании топлива источников тепла (например, газовых турбин), источник тепла, работающий на солнечной энергии, ядерный источник тепла, геотермальный источник тепла или источник сбросового промышленного тепла. В дополнительных вариантах выполнения изобретения энергия может подаваться от источника, который, по существу, не нагревательный, но который объединен с теплогенерирующим элементом. Например, вращающийся элемент (например, ветряная турбина) может быть соединен с тепловым насосом.

Возвращаясь к фиг. 1, можно видеть, что после нагрева в теплообменнике 155 рециркуляционный CO_2 поток 141 второй части расширяется в турбине 165, вырабатывая мощность вместе с генератором 170. Выхлопной поток 142 турбины может использоваться различными способами для сообщения дополнительного нагрева рециркуляционному CO_2 потоку 138 первой части. Как показано на фиг. 1, выхлопной поток 142 турбины пропускается через рекуперативный теплообменник 125 для дополнительного нагрева рециркуляционного CO_2 потока первой части. Хотя выхлопной поток 142 турбины показан поступающим на горячий край теплообменника, понятно, что этот выхлопной поток 142 турбины может вводиться в рекуперативный теплообменник 125 при соответствующем уровне нагрева, основанном на истинной температуре потока 142. Кроме того, в некоторых вариантах выполнения выхлопной поток 142 турбины может не возвращаться в теплообменник 125. Предпочтительнее поток 142 может вводиться в рециркуляционный CO_2 поток 133, или в рециркуляционный CO_2 поток 127, или в оба потока. Хотя показан один рекуперативный теплообменник 125, может использоваться группа рекуперативных теплообменников, работающих в разных температурных диапазонах, и поток 142 может вводиться в любые один или несколько теплообменников из указанной группы.

В других вариантах выполнения выхлопной поток 142 турбины может объединяться с рециркуляционным CO_2 потоком 138 первой части перед его вводом в рекуперативный теплообменник 125. В таких вариантах выполнения может обеспечиваться, например, дополнительное сжатие рециркуляционного CO_2 потока 151 первой части и(или) нагретого рециркуляционного CO_2 потока 141 второй части.

В других дополнительных вариантах выполнения выхлопной поток 142 турбины может проходить через отдельный теплообменник (на фиг. 1 не показан). Рециркуляционный CO_2 поток 138 первой части может пропускаться через отдельный теплообменник перед его вводом в рекуперативный теплообменник. Отводной поток от рециркуляционного CO_2 потока 138 первой части, отобранный при его прохождении через рекуперативный теплообменник в соответствующем температурном диапазоне, может быть выведен и пропущен через отдельный теплообменник, и этот нагретый отводной поток может быть снова объединен с рециркуляционным CO_2 потоком первой части в соответствующем диапазоне подогрева. Весь нагретый рециркуляционный CO_2 поток 143 или его часть после рекуперативного теплообменника 125 могут быть пропущены через отдельный теплообменник. В этих иллюстративных вариантах выполнения тепло, обеспечиваемое во втором цикле 150 генерации мощности, сообщает дополнительный нагрев рециркуляционному CO_2 потоку 138 первой части, выходящий за предельный нагрев, которого можно достичь только от потока 122 выхлопов турбины. Затем нагретый рециркуляционный CO_2 поток 143 вводится в камеру 115 сгорания.

Выхлопной поток 142 турбины из второго цикла 150 генерации мощности охлаждается при пропускании через рекуперативный теплообменник 125 и выходит с его холодного края как рециркуляционный CO_2 поток 144, который, как показано, воссоединяется с в основном чистым рециркуляционным CO_2 потоком 133, выходящим из сепаратора 130. Предпочтительно турбина 165 во втором цикле 150 генерации мощности может действовать при достаточной степени расширения, так чтобы давление в выхлопном потоке 142 турбины было, по существу, близким к требуемому давлению в точке первого цикла генерации мощности, где происходит рекомбинация рециркуляционного CO_2 потока. В некоторых вариантах выполнения рециркуляционный CO_2 поток 144, выходящий из рекуперативного теплообменника 125, может иметь температуру, при которой желательно дополнительное охлаждение. Такое охлаждение может происходить, например, в сепараторе 130 при воссоединении рециркуляционного CO_2 потока 144 с потоком 127 низкого давления. Альтернативно, рециркуляционный CO_2 поток 144 может проходить через дополнительный холодильник (на фиг. 1 не показан).

Дополнительное тепло, обеспечиваемое вторым циклом генерации мощности, как показано в приведенном выше примере, может быть особенно полезно для снижения или устранения температурной разницы, которая в другом случае образуется на горячем краю рекуперативного теплообменника из-за

различной удельной теплоемкости турбинных выхлопов, поступающих в рекуперативный теплообменник, и рециркуляционного CO_2 потока, выходящего из рекуперативного теплообменника. Излагаемые системы и способы ориентированы на достижение такого преимущества за счет обеспечения необходимого количества и параметров тепла для дополнительного нагрева. На основе знания расхода, давления и температуры рециркуляционного CO_2 потока, поступающего в турбину во второй системе генерации мощности, может быть выбрана степень расширения, позволяющая рециркуляционному CO_2 потоку, выходящему из турбины во втором цикле генерации мощности, обеспечивать минимальное количество тепла и температуру, необходимые для рекуперативного теплообменника в первом цикле генерации мощности.

Описанные выше система и способ создают термодинамический замкнутый контур, вложенный в первый цикл генерации мощности. Газовая смесь во вложенном цикле имеет возможность взаимодействовать с нагретым непосредственно рециркуляционным CO_2 потоком, так как оба цикла могут совместно использовать насосное оборудование, а также, при необходимости, конденсационное оборудование. Например, хотя поток 144 на фиг. 1 показан объединенным с потоком 133, он альтернативно может объединяться с потоком 127 перед поступлением в сепаратор 130 и(или) перед поступлением в конденсационный аппарат (на фиг. 1 не показан).

Как первый цикл генерации мощности, так и второй цикл генерации мощности могут выполняться независимо друг от друга для выработки энергии. Однако их объединение дает определенные преимущества. В первом цикле генерации мощности, таком как показанный на фиг. 1, преимущество заключается в возможности рекуперации значительного количества тепла турбинных выхлопов для использования при повторном нагреве рециркуляционного CO_2 потока после его сжатия и перед поступлением в камеру сгорания. Однако эффективность может быть ограничена способностью добавления количества тепла, достаточного для увеличения температуры рециркуляционного CO_2 потока, выходящего с горячего края рекуперативного теплообменника, до значения, достаточно близкого к температуре турбинных выхлопов, поступающих на горячий край рекуперативного теплообменника. Необходимость во введении дополнительного нагрева установлена в патенте US 8596075 на имя Allam и др., где также определены различные источники низкотемпературного тепла (например, с температурой менее приблизительно 500°C). Настоящее изобретение еще более усовершенствует такие системы и способы тем, что может использоваться внешний источник тепла (то есть тепла, полностью независимого от первого цикла генерации мощности) для обеспечения дополнительного нагрева, необходимого для достижения требуемой эффективности работы рекуператора, при одновременном обеспечении значительного увеличения выработки энергии без необходимости в существенных изменениях исходного оборудования в первом цикле генерации мощности. В частных вариантах выполнения настоящее изобретение конкретно обеспечивает объединение существующих энергетических установок/оборудования в цикл генерации мощности, в котором в качестве рабочего потока используется рециркуляционный CO_2 поток.

В некоторых вариантах выполнения представленные системы и способы могут быть приспособлены для повышения эффективности цикла генерации мощности. Для этого цикл генерации мощности может быть задействован по другому по сравнению с описанным первым циклом генерации мощности. Цикл генерации мощности с повышенной эффективностью, как правило, может включать в себя любой цикл генерации мощности, в котором содержащее CO_2 рабочее тело повторно циркулирует по меньшей мере через стадии сжатия, нагрева, расширения и охлаждения. В различных вариантах выполнения цикл генерации мощности, эффективность которого может быть повышена, может включать комбинацию следующих стадий:

сжигание углеродсодержащего топлива с окислителем в присутствии рециркуляционного CO_2 потока для создания потока продуктов горения с температурой по меньшей мере приблизительно 500°C или по меньшей мере приблизительно 700°C (например, приблизительно от 500 до приблизительно 2000°C или приблизительно от 600 до приблизительно 1500°C) и давлением по меньшей мере приблизительно 100 бар (10 МПа) или по меньшей мере приблизительно 200 бар (20 МПа) (например, приблизительно от 100 бар (10 МПа) до приблизительно 500 бар (50 МПа) или приблизительно от 150 бар (15 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа));

расширение рециркуляционного CO_2 потока высокого давления в турбине для генерации мощности; охлаждение высокотемпературного рециркуляционного CO_2 потока (под давлением, например, указанным выше), в частности выхлопного потока турбины, в рекуперативном теплообменнике;

конденсация одного или нескольких продуктов горения (например, воды) в конденсационном аппарате, при этом продукты горения присутствуют, в частности, в расширенном потоке продуктов горения;

сжатие рециркуляционного CO_2 потока до высокого давления (например, до давления, указанного выше), опционально выполняемое в несколько стадий с промежуточным охлаждением для повышения плотности потока; и

нагрев сжатого рециркуляционного CO_2 потока в рекуперативном теплообменнике, в частности нагрев от охлаждающегося выхлопного потока турбины.

Как отмечено выше, повышенной эффективности цикла генерации мощности можно достичь, в частности, за счет введения дополнительного нагрева (например, в рекуперативном теплообменнике) сжа-

того рециркуляционного CO_2 выше уровня, достижимого при нагреве от выхлопного потока турбины. В настоящем изобретении такой дополнительный нагрев достигается путем использования части рециркуляционного CO_2 потока из цикла генерации мощности.

Предпочтительно вложенный цикл может добавляться к циклу генерации мощности с использованием, по меньшей мере, того же компрессорного оборудования, которое используется в цикле генерации мощности. В частности, дополнительный нагрев может обеспечиваться за счет отвода части сжатого рециркуляционного CO_2 , нагрева отведенной части сжатого рециркуляционного CO_2 от источника тепла, независимого от цикла генерации мощности, и передачи тепла от отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 остальной части сжатого рециркуляционного CO_2 в цикле генерации мощности. Таким образом, вложенный цикл может быть в основном аналогичным второму циклу генерации мощности, описанному в связи с фиг. 1.

В других вариантах выполнения настоящее изобретение относится также к системам генерации мощности. В частности, такие системы могут содержать один или несколько насосов или компрессоров, выполненных с возможностью сжатия CO_2 потока до высокого давления, как описано. Системы могут содержать один или несколько пневмораспределителей или делителей, выполненных с возможностью разделения сжатого CO_2 потока по меньшей мере на CO_2 поток первой части и CO_2 поток второй части. Системы могут содержать первый теплообменник (или теплообменный блок, содержащий группу секций), выполненный с возможностью нагрева CO_2 потока первой части от высокотемпературного выхлопного потока турбины, и второй теплообменник, выполненный с возможностью нагрева CO_2 потока второй части от нагретого потока, поступающего от внешнего (или независимого) источника тепла.

Системы могут содержать первую турбину, выполненную с возможностью расширения CO_2 потока первой части для генерации мощности, и вторую турбину, выполненную с возможностью расширения CO_2 потока второй части для генерации мощности. Системы могут содержать один или несколько передаточных элементов, выполненных с возможностью передачи тепла от нагретого CO_2 потока второй части CO_2 потоку первой части. Системы могут содержать камеры сгорания, выполненные с возможностью сжигания углеродсодержащего топлива в окислителе в присутствии CO_2 потока первой части.

Согласно настоящему изобретению системы могут отличаться по конфигурации как основная система генерации мощности и вспомогательная система генерации мощности, каждая из которых имеет отдельный источник тепла и по меньшей мере один совместно используемый компрессорный элемент (и опционально по меньшей мере один совместно используемый конденсационный элемент). Например, согласно настоящему изобретению система может включать основную систему генерации мощности, содержащую компрессор, выполненный с возможностью сжатия CO_2 потока до высокого давления, как описано, первую турбину, установленную ниже по потоку камеры сгорания и выше по потоку компрессора, и первый теплообменник, помещенный так, чтобы принимать поток из компрессора и принимать отдельный поток из турбины. Опционально ниже по потоку первого теплообменника и выше по потоку компрессора может быть установлен сепаратор. Как дополнительная опция еще компрессор может быть установлен выше по потоку упомянутого компрессора и ниже по потоку первого теплообменника. Согласно настоящему изобретению система может также включать вспомогательную систему генерации мощности, содержащую компрессор из основной системы генерации мощности, вторую турбину, установленную ниже по потоку компрессора, и второй теплообменник, размещенный так, чтобы принимать поток из компрессора и принимать отдельный поток от внешнего (или независимого) источника тепла. Эта система может также содержать один или несколько пневмораспределителей или делителей, размещенных ниже по потоку компрессора и выше по потоку первого теплообменника и второго теплообменника.

Пример.

Варианты выполнения настоящего изобретения дополнительно проиллюстрированы следующим примером, приведенным для пояснения сущности представленного изобретения и не предназначенным для ограничения его объема. Нижеследующее описывает вариант системы и способа генерации мощности с использованием вложенного CO_2 цикла, как показано на фиг. 2.

Цикл генерации мощности промоделирован с учетом комбинации газовой турбины с циклом генерации мощности, в котором используется циркулирующий рабочий CO_2 поток, такой как описан в патенте US 8596075 на имя Allam и др., при этом указанный цикл генерации мощности в данном описании далее называется циклом Аллама (Allam cycle). Промышленные газовые турбины представляют собой эффективные, низкзатратные, надежные системы с долгой историей промышленного усовершенствования и, кроме того, широко распространенные по всему миру. Цикл Аллама предлагает приблизительно такую же эффективность, что и комбинированный цикл на природном газе, при одинаковых капитальных затратах, но с преимуществом, заключающимся в улавливании всего CO_2 , полученного из природного газа, в виде в основном чистого продукта при давлении в трубопроводе, составляющем обычно приблизительно от 100 бар (10 МПа) до приблизительно 200 бар (20 МПа). В иллюстративном варианте выполнения газовая турбина интегрирована с циклом Аллама путем исключения всей энергетической паровой системы установки, работающей по комбинированному циклу на природном газе, и использования горячих выхлопных газов турбины для генерации дополнительной мощности с использованием в качестве

ве рабочего тела CO_2 , поступающего из цикла Аллама, а также обеспечения подачи требуемого низкотемпературного тепла в цикл Аллама для достижения максимальной эффективности. Такое сочетание позволяет поддерживать высокую эффективность интегрированной системы, и в то же время обеспечивать низкие капитальные затраты на кВт проектной мощности. В некоторых вариантах выполнения представленное в настоящем изобретении сочетание может сопровождаться, по существу, незначительным снижением эффективности интегрированной системы. Однако в других вариантах выполнения снижения общей эффективности фактически может не быть. В других вариантах выполнения представленное в настоящем изобретении сочетание может обеспечивать увеличение эффективности интегрированной системы. В различных вариантах выполнения настоящего изобретения благоприятным результатом может быть также снижение капитальных затрат.

Короче говоря, в иллюстративном варианте выполнения горячие выхлопы из газовой турбины пропускают через блок рекуперации тепла, аналогичный паровому генератору рекуперации тепла, в котором нагревается поток CO_2 высокого давления (например, от 300 бар (30 МПа) до 500 бар (50 МПа)), ответвленный как дополнительный поток из работающих по циклу Аллама блоков компрессии рециркуляционного CO_2 . Нагретый CO_2 пропускается через энергетическую турбину, имеющую давление на выходе, соответствующее входному давлению CO_2 насоса в цикле Аллама или входному давлению, или промежуточному давлению компрессора в CO_2 цикле. Выходной поток из вспомогательной турбины, имеющий температуру приблизительно от 200 до приблизительно 500°C, затем используется для низкотемпературного нагрева рециркуляционного CO_2 потока высокого давления в цикле Аллама, а также дополнительного нагрева, требуемого для теплообменника выхлопов газовой турбины. Опционально может существовать дополнительный подвод низкотемпературного тепла к результирующим CO_2 потокам высокого давления за счет адиабатического действия главного воздушного компрессора криогенной кислородной установки. Это высвобождает часть выходного потока вспомогательного устройства расширения для предварительного нагрева всего природного газа, подаваемого в газовую турбину и камеру сгорания цикла Аллама. Опционально температура выхлопов газовой турбины может быть увеличена за счет дополнительного сжигания топливного газа с использованием кислорода, сохранившегося в выхлопах газовой турбины. Это повышает входную температуру и выходную мощность вспомогательной энергетической турбины, так как CO_2 поток высокого давления будет нагрет до большей температуры в нагревателе выхлопов газовой турбины. Опционально с использованием выхлопного потока вспомогательной турбины может быть нагрет охлаждающийся поток работающей в цикле Аллама турбины высокого давления при температуре, лежащей в диапазоне приблизительно от 300 до приблизительно 500°C, а не основной выхлопной поток турбины в цикле Аллама. Входная температура вспомогательной газовой турбины может лежать в диапазоне приблизительно от 500 до приблизительно 900°C. Никакого специального внутреннего или пленочного охлаждения, или покрытия турбинных лопаток при таких температурах не потребуются.

Иллюстративный вариант выполнения интегрированной системы представлен на фиг. 2, на которой дан пример схемы, основанной на объединении газовой турбины типа GE7FB и работающей по циклу Аллама энергетической установки, имеющей конкретные параметры, приведенные в табл. 1 ниже (при этом все расчеты основываются на использовании в качестве топливного газа чистого метана (CH_4)).

Таблица 1

Параметр	Система типа 7FB на комбинированном цикле на природном газе	Энергетическая система на цикле Аллама
Полезная выходная мощность	280,3 МВт	298,2 МВт
Подача тепла от природного газа	488,8 МВт	510,54 МВт
Общий кпд	57,3%	58,41%
Разрежение в устройстве конденсации	43 мм рт. ст. (0,835 psia)	–
Мощность газовой турбины	183,15 МВт	–
Подача O_2 (99,5 мол.% при 30 бар (3 МПа))	–	3546 Мт/день
Выход CO_2 (с чистотой 97 мол.% при 150 бар)	–	2556 Мт/день

Обращаясь к фиг. 2, можно видеть, что газовая турбина 1 типа GE 7FB, соответствующая требованиям ISO, имеет входной воздушный поток 64, поступающий в компрессор газовой турбины, и поток 3 природного газа, поступающий в камеру 2 сгорания газовой турбины. Газовая турбина вырабатывает 183,15 МВт выходной мощности 6, снимаемой с подсоединенного генератора 5. Выхлопы 4 газовой турбины с температурой 624°C могут нагреваться в топочной камере 26 при сжигании дополнительного потока 27 природного газа с выработкой нагретого потока 28, который пропускается через теплообменник 58 для предварительного нагрева рециркуляционного CO_2 потока 38 высокого давления, имеющего давление 305 бар и температуру 50°C, с получением нагретого выходного потока 29 и охлажденного вы-

хлопного потока 34, который может быть выведен в атмосферу. Эффективность всей системы не изменяется при сжигании дополнительного топлива в выхлопах газовой турбины типа 7FB, производимого для увеличения входной температуры вспомогательной турбины 7 высокого давления. Рециркуляционный CO_2 поток 38 высокого давления отбирается как дополнительный поток с выхода соединенного с электродвигателем 56 CO_2 компрессора 55 цикла Аллама. Турбина 7 соединена с электрогенератором 8, выдающим экспортную мощность 9. В конкретном рассмотренном случае подобрана конкретная турбина с выходным давлением 30 бар (3 МПа) и входным давлением 300 бар (30 МПа). Подвод тепла к выхлопам турбины 7FB в топочной камере 26 составляет 65,7 МВт. Это приводит к тому, что выхлопной поток 4 турбины 7FB нагревается до температуры от 624 до 750°C. Температура выходного потока 66 составляет 457°C, и выходное давление в 30 бар (3 МПа) позволяет этому потоку, пройдя охлаждение, быть повторно сжатым в двухступенчатом CO_2 компрессоре 18 цикла Аллама, имеющем входное давление 29 бар (2,9 МПа). Наиболее предпочтительные значения выходных давлений турбины 7 соответствуют входному, промежуточному и выходному давлениям рециркуляционного CO_2 компрессора 18, которые лежат в диапазоне от 29 бар (2,9 МПа) на входе до 67 бар (6,7 МПа) - 80 бар (8 МПа) на выходе в зависимости от способности к охлаждению охлаждающей воды/среды.

Выходной поток 66 турбины вводится в систему для предварительного нагрева CO_2 потоков высокого давления оптимальным образом. Поток 66 делится на 3 части. Поток 65 поступает в теплообменник 68, где он используется для предварительного нагрева потоков (3а-3, 14а-14 и 27а-27) природного газа до выходной температуры 425 °С, и выходит из него в виде потока 67. Поток 25 поступает в теплообменник 60, где он используется для нагрева CO_2 потока 36 с давлением 300 бар (30 МПа) и температурой 50°C, отведенного от выходного потока 35 CO_2 насоса 55, с целью формирования охлаждающего потока 62 с температурой 400°C для турбины 17 цикла Аллама, а также внешне нагретого рециркуляционного CO_2 потока 59 с температурой 424°C, который направляется в главный теплообменник 61 в промежуточной точке. Поток 30 поступает в охладитель 58 выхлопов турбины 7FB в промежуточной точке и обеспечивает дополнительный нагрев в низкотемпературной секции, выходя как поток 32. Эти три отдельные теплообменные функции выхлопного потока 66 вспомогательной турбины компенсируют значительное увеличение удельной теплоемкости CO_2 потока с давлением 300 бар (30 МПа) при низких температурах и охватывают действия, требуемые для общего нагрева CO_2 потока высокого давления.

Установка 82 криогенного разделения воздуха выдает поток 49 товарного кислорода с давлением 30 бар (3 МПа) и чистотой 99,5 мол.%. Поток 83 подачи воздуха адиабатически сжимается в осевом компрессоре 69 и соединенном с ним бустерном воздушном компрессоре 70, которые приводятся в действие общим электродвигателем 71. Весь поток подаваемого воздуха сжимается в компрессоре 69 до давления 5,7 бар (0,57 МПа). Выходящий воздух 78 с температурой 226°C используется для нагрева поступающего под давлением 300 бар (30 МПа) CO_2 потока 74 от температуры 50°C до температуры 220°C в теплообменнике 73, выдающем выходной поток 75. Последний разделяется на два потока 76 и 77, которые вводятся в промежуточные точки в теплообменники 60 и 58 соответственно, обеспечивая дополнительный подвод тепла самого низкого температурного уровня в процесс нагрева CO_2 потоков 38 и 36 высокого давления. Основной поток 80 подачи воздуха и воздушный поток 81 с давлением, повышенным до 65 бар (6,5 МПа), охладившись до температуры, близкой к окружающей, поступают в блок 82 разделения воздуха.

Действующая по циклу Аллама система содержит турбину 17 с соответствующей камерой 13 сгорания, соединенную с электрогенератором 16, вырабатывающим выходную мощность 15. Поток 11 природного топливного газа сжимается до давления 320 бар (32 МПа) в двухступенчатом компрессоре 12 с приводом от электродвигателя 10. Природный газ предварительно нагревается в теплообменнике 68. Турбина непосредственно соединена с главным компрессором 18 рециркуляционного CO_2 , имеющим две ступени с промежуточным холодильником 19. Входное давление в линии 21 составляет 29 бар (2,9 МПа), и выходное давление в линии 22 составляет 67 бар (6,7 МПа).

Выходной поток 22 охлаждается почти до температуры окружающей среды в теплообменнике 40, выдающем входной поток 39 CO_2 насоса с плотностью приблизительно 0,8 кг/л. Выходной поток насоса создает (кроме главного рециркуляционного CO_2 потока 37) дополнительные потоки 36, 38 и 74, используемые для интеграции в систему газовой турбины типа 7FB. Товарный CO_2 , выработанный при сжигании потока 14 природного газа, отводится под давлением 305 бар (30,5 МПа) в виде потока 84 для направления в трубопроводную магистраль. Блок 61 главного рекуперативного теплообменника цикла Аллама охлаждает выхлопной поток 24 турбины с температурой 725°C до потока 41 с температурой 60°C, который вбирает в себя добавляемый поток 33 системы интеграции газовой турбины 7FB (поток 3 3 представляет собой комбинацию потока 31 из теплообменника 60 и потока 32 из теплообменника 60, а также потока 67 из теплообменника 68). Объединенный поток 42 охлаждается до температуры, близкой к окружающей, в холодильнике 43, образуя поток 44, поступающий в сепаратор 45, где от него отделяется конденсированная жидкая вода, выходящая в виде потока 46. Выходной газовый CO_2 поток 47 под давлением 29 бар (2,9 МПа) разделяется на входной поток 21 главного рециркуляционного CO_2 компрессора и поток 48, смешивающийся с потоком 49 чистого кислорода, образуя поток 50 окислителя с молярным содержанием O_2 25%. Этот последний поток сжимается до давления 305 бар (30,5 МПа) в многоступен-

чатом компрессоре 54 (с промежуточным холодильником 54а), приводимом в действие электродвигателем 52. Выходной поток 51 и рециркуляционный CO_2 поток 37 нагреваются в теплообменнике 61 до температуры 715°C от выхлопного потока 24 турбины, образуя поток 20, поступающий в камеру 13 сгорания, и поток 23, поступающий в выходной поток камеры сгорания, снижая входную температуру турбины 17 приблизительно до 1150°C.

Иллюстративная интегрированная система включает газовую турбину специальной модели, что приводит к эффективному использованию тепла, заключенного в выхлопах газовой турбины. Могут использоваться большие и меньшие газовые турбины. Значения параметров, относящиеся к приведенной иллюстративной модели турбины, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Интегрированная система
Общая выходная мощность	594,1 МВт
Общая подача тепла от природного газа	1040 МВт
Результирующий КПД	57,131%
Подача O_2 (99,5 мол.% при 30 бар (3 МПа))	3546 Мт/день
Выход CO_2 (с чистотой 97 мол.% при 150 бар)	2556 Мт/день

Приведенная в качестве примера система может использоваться для интеграции существующих газотурбинных блоков с открытым циклом и сжатым воздухом окружающей среды в качестве рабочего тела. Она аналогично применима к газовым турбинам с замкнутым циклом, в которых используются кислородно-топливные камеры сгорания и в которых охлажденные турбинные выхлопы используются для ввода в компрессор газовой турбины после удаления выработанного CO_2 , воды, инертных газов и избыточного кислорода. Для газовых турбин такого типа возможно практически полное удаление CO_2 из системы. Для обычных газовых турбин с открытым циклом только CO_2 , полученный в цикле Аллама, может быть удален для отвода.

Специалист в данной области техники может представить себе множество модификаций и других вариантов выполнения раскрытой в данном описании сущности изобретения, которые будут связаны с этой сущностью изобретения, но будут иметь преимущество, основанное на знании, представленном в приведенном выше описании и сопровождающих чертежах. Поэтому нужно понимать, что настоящее изобретение не должно ограничиваться конкретными описанными вариантами выполнения, и модификации и другие варианты выполнения предназначены для включения в объем прилагаемой формулы изобретения. Хотя в данном описании применены специфические термины, они используются только в обобщенном и описательном смысле и не предназначены для ограничения объема изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ генерации мощности, включающий

осуществление первого цикла генерации мощности, в котором рабочий CO_2 поток подвергается многократному расширению для генерации мощности, охлаждению, сжатию, нагреву и вовлечению в процесс горения; и

осуществление второго цикла генерации мощности, в котором по меньшей мере часть сжатого рабочего CO_2 потока из первого цикла генерации мощности нагревается от источника тепла, независимого от первого цикла генерации мощности, расширяется для генерации мощности и воссоединяется с рабочим CO_2 потоком в первом цикле генерации мощности.

2. Способ по п.1, в котором при осуществлении первого цикла генерации мощности

расширение для генерации мощности включает расширение рабочего CO_2 потока в первой турбине с выработкой первой части мощности;

охлаждение включает отбор тепла от рабочего CO_2 потока в рекуперативном теплообменнике;

сжатие включает сжатие рабочего CO_2 потока по меньшей мере одним компрессором;

нагрев включает нагрев рабочего CO_2 потока с использованием отобранного тепла в рекуперативном теплообменнике и

процесс горения включает перегрев сжатого рабочего CO_2 потока в камере сгорания.

3. Способ по п.1 или 2, в котором нагрев в первом цикле генерации мощности включает получение тепла, сообщенного рабочему CO_2 потоку во втором цикле генерации мощности.

4. Способ по п.1 или 2, в котором источник тепла во втором цикле генерации мощности представляет собой один или несколько компонентов из группы, включающей источник, использующий тепло горения, источник тепла, работающий на солнечной энергии, ядерный источник тепла, геотермальный источник тепла и источник сбросового промышленного тепла.

5. Способ по п.1 или 2, в котором расширенный рабочий поток из второго цикла генерации мощности используют для передачи тепла рабочему CO_2 потоку в первом цикле генерации мощности после сжатия и перед процессом горения.

6. Способ по п.1 или 2, в котором рабочий CO_2 поток из второго цикла генерации мощности после воссоединения с рабочим CO_2 потоком в первом цикле генерации мощности представляет собой один

или несколько компонентов из группы, включающей

входной поток после охлаждения и перед сжатием в первом цикле генерации мощности;

входной поток после сжатия и перед нагревом;

входной поток в процессе нагрева в первом цикле генерации мощности.

7. Способ повышения эффективности цикла генерации мощности, включающий

осуществление цикла генерации мощности так, что сжатый рециркуляционный CO_2 пропускается через камеру сгорания, в которой углеродсодержащее топливо сжигается в присутствии окислителя с получением выходного потока, содержащего рециркуляционный CO_2 ;

выходной поток расширяется в турбине для генерации мощности и с формированием выхлопного потока турбины, содержащего рециркуляционный CO_2 ;

выхлопной поток турбины охлаждается в рекуперативном теплообменнике;

охлажденный выхлопной поток турбины пропускается через сепаратор для отделения рециркуляционного CO_2 ;

рециркуляционный CO_2 сжимается и

сжатый рециркуляционный CO_2 нагревается при пропускании через упомянутый рекуперативный теплообменник от выхлопного потока турбины; и

дополнительный нагрев сжатого, рециркуляционного CO_2 выше уровня нагрева, достижимого от выхлопного потока турбины, при этом дополнительный нагрев обеспечивается путем отвода части сжатого рециркуляционного CO_2 , нагрева отведенной части сжатого рециркуляционного CO_2 от источника тепла, независимого от цикла генерации мощности, и передачи тепла от отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 остальной части сжатого рециркуляционного CO_2 в цикле генерации мощности.

8. Способ по п.7, включающий пропускание отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 через рекуперативный теплообменник, так чтобы в нем передать тепло сжатому рециркуляционному CO_2 .

9. Способ по п.7, включающий пропускание отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 через второй теплообменник для нагрева рециркуляционного бокового CO_2 потока, который затем объединяется с остальной частью сжатого рециркуляционного CO_2 в рекуперативном теплообменнике.

10. Способ по п.7, включающий расширение отведенного и нагретого сжатого рециркуляционного CO_2 потока во второй турбине для генерации мощности.

11. Система генерации мощности, содержащая первый контур/цикл генерации мощности, включающий

компрессор, выполненный с возможностью сжатия CO_2 потока до давления по меньшей мере приблизительно 100 бар (10 МПа);

камеру сгорания ниже по потоку от компрессора;

первую турбину ниже по потоку от камеры сгорания и выше по потоку от компрессора;

первый теплообменник, установленный так, чтобы принимать поток от компрессора и принимать отдельный поток от турбины, и выполненный с возможностью передачи тепла между этими потоками; и

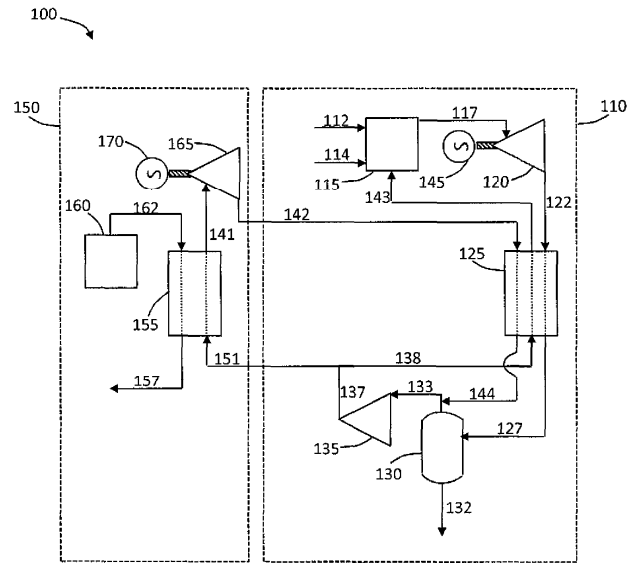
второй контур генерации мощности, включающий

вторую турбину ниже по потоку от компрессора и

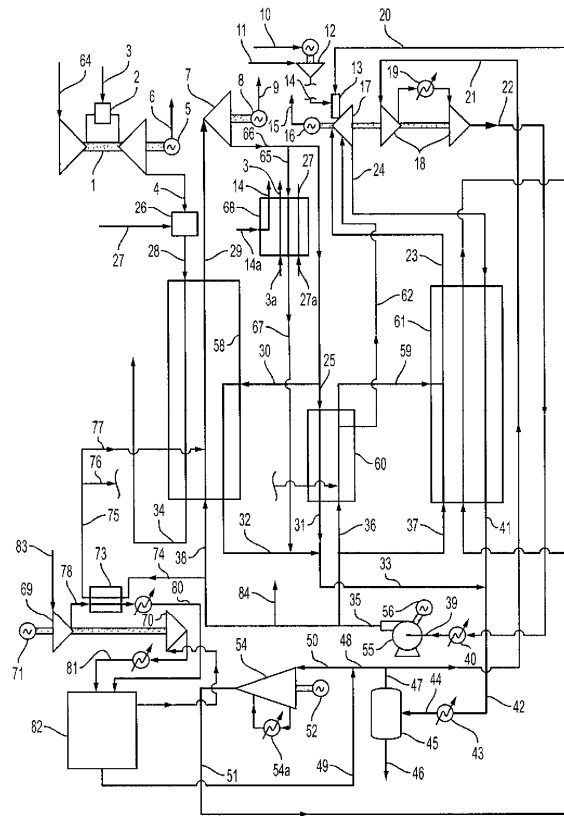
второй теплообменник, установленный так, чтобы принимать поток от компрессора и принимать отдельный поток от источника тепла,

при этом выход второй турбины связан по потоку с первым контуром генерации мощности.

12. Система по п.11, в которой источник тепла для отдельного потока, принимаемого вторым теплообменником, представляет собой один или несколько компонентов из группы, включающей источник, использующий тепло горения, источник тепла, работающий на солнечной энергии, ядерный источник тепла, геотермальный источник тепла и источник сбросового промышленного тепла.



Фиг. 1



Фиг. 2



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2