

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **034397**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.02.04**

(21) Номер заявки  
**201300387**

(22) Дата подачи заявки  
**2011.09.20**

(51) Int. Cl. **F01D 5/08** (2006.01)  
**F01D 5/18** (2006.01)  
**F01D 25/14** (2006.01)  
**F02C 3/34** (2006.01)

---

(54) **СПОСОБ, УСТРОЙСТВО И СИСТЕМА ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ**

---

(31) **61/385,039; 61/385,047; 61/437,330;  
13/236,240**

(32) **2010.09.21; 2010.09.21; 2011.01.28;  
2011.09.19**

(33) **US**

(43) **2013.09.30**

(86) **PCT/US2011/052375**

(87) **WO 2012/040214 2012.03.29**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ПАЛМЕР ЛЭБС, ЛЛК; 8 РИВЕРЗ  
КЭПИТЛ, ЛЛК (US)**

(72) Изобретатель:  
**Палмер Майлз Р. (US), Аллам Родни  
Джон (GB), Фетведт Джереми Эрон  
(US)**

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

(56) **US-A1-2011179799  
US-A-815596  
WO-A2-2010072710  
US-A-4318672**

---

(57) В заявке описаны способы, устройства и системы выработки энергии, которые могут увеличить КПД и снизить стоимость компонентов благодаря контролю, снижению или устранению механической эрозии турбинных лопаток из-за воздействия твердых частиц или химической деструкции из-за воздействия газов, присутствующих в потоке продуктов горения. Способы, устройства и системы могут включать использование турбинных лопаток, работающих на скоростях, существенно сниженных по сравнению с обычными турбинами, используемыми в типовых системах выработки энергии. В способах и системах может также использоваться рециклированная циркулирующая текучая среда для создания транспирационной защиты турбины и(или) других компонент. Кроме того, рециклированная циркулирующая текучая среда может также использоваться для подачи в турбину очищающих материалов.

---

**034397**  
**B1**

**034397**  
**B1**

### **Область техники**

Настоящее изобретение относится к турбине и компонентам камеры сгорания, которые могут использоваться в способах выработки энергии и соответствующих системах. Изобретение относится также к способам использования такой турбины и компонентов камеры сгорания при выработке энергии.

### **Уровень техники**

Газовые турбины обычно используются в способах и системах выработки энергии (электроэнергии) для получения энергии от потока газообразных продуктов горения, направляемого на лопатки, имеющиеся в турбине, с целью вращения турбинного вала. Энергия может сниматься с вращающегося вала посредством генератора, обеспечивающего энергию в виде электричества. Из-за экстремальных условий (например, высоких температур и наличия подверженных эрозии и(или) коррозии материалов), в которых работают газовые турбины в обычных электрогенерирующих установках (например, энергетических установках, работающих на сжигании угля), компоненты турбины обычно выполняются из высококачественных материалов. Поэтому газовые турбины часто являются дорогостоящими компонентами объектов, вырабатывающих энергию.

Существующие турбины могут работать при входных температурах приблизительно от 1200 до 1400°C и температурах лопаток приблизительно от 900 до 1000°C. Поэтому в газовых турбинах, работающих на объектах, вырабатывающих энергию, как правило, необходимо использовать жаропрочные материалы, выдерживающие высокие температуры. Кроме того, в наиболее совершенных конструкциях требуется также охлаждение лопаток наряду с применением совершенных технологий изготовления, таких как направленное отверждение материалов и даже технология монокристаллических лопаток. Охлаждение лопаток используется для повышения стойкости турбины к температуре и, следовательно, повышения ее коэффициента полезного действия, но этот процесс ограничен тем, что только воздух или в некоторых случаях пар пригодны для охлаждения. Количество воздуха, которое можно использовать для охлаждения, ограничено количеством энергии, которую можно направить на сжатие и перекачку воздуха и иногда пара через турбинные лопатки. Кроме того, воздух обычно обеспечивается под ограниченным давлением, например близком к атмосферному, и поэтому имеет ограниченную способность к теплопередаче, даже при высоких расходах. Более того, воздух содержит большое количество кислорода, который активно вступает в реакцию при высоких температурах, и это является дополнительным фактором, обуславливающим ограничение в металлургии турбинных лопаток только материалами, обладающими высокой стойкостью к окислению, например жаропрочными материалами. Таким образом несмотря на использование совершенных материалов и охлаждения лопатки газовой турбины все же подвержены окислению и в некоторых случаях разрушению паром.

Несмотря на истощение источников органического топлива остаются огромные запасы угля, который может использоваться при производстве энергии, но сжигание таких твердых топлив приводит не только к загрязнению, но также к образованию частиц, которые могут повреждать компоненты систем выработки энергии, в частности турбинные лопатки. Такое повреждение в особенности вызывается частицами, содержащимися в потоках продуктов горения, взаимодействующих с турбинными лопатками при высоких скоростях, например, вплоть до превышающих 600 миль/ч (268 м/с). Предшествующие попытки уменьшить такое повреждение включали требование введения фильтрационных систем для удаления частиц из потоков продуктов горения до их прохождения через турбину, а также использование высококачественных материалов в конструкции лопаток, как упоминалось выше. Однако выполнение таких требований повышает стоимость систем выработки энергии. Кроме того, выполнение таких требований увеличивает сложность систем выработки энергии и может приводить к снижению эффективности способов выработки энергии. Соответственно существует потребность в усовершенствованной технологии лопаток газовых турбин, в которой устранена по меньшей мере часть упомянутых ограничений, присущих современному уровню техники.

### **Сущность изобретения**

Настоящее изобретение обеспечивает способы, устройства и системы выработки энергии, которые могут увеличить КПД и снизить стоимость компонентов благодаря контролю, снижению или устранению химической деструкции турбинных лопаток из-за воздействия воздуха и пара и механической эрозии из-за воздействия твердых частиц, присутствующих в потоке продуктов горения. Способы, устройства и системы включают использование потоков текучей среды с повышенным давлением и(или) турбинных лопаток с увеличенной общей площадью, что позволяет достигать требуемой выработки энергии при значительно сниженных скорости и температуре турбинных лопаток. В частности, изобретение обеспечивает турбины со значительно уменьшенным по меньшей мере одним размером и более холодными лопатками по сравнению с турбинами, используемыми в обычных системах выработки энергии. Такие турбины особенно пригодны для использования в способе или системе выработки энергии. Например, способ или система могут быть такими, что включают применение высокого давления и высокого коэффициента повторного использования циркулирующей текучей среды или рабочего тела, например циркулирующей текучей среды на основе CO<sub>2</sub>. Кроме того, технология охлаждения лопаток может быть объединена с конструкцией лопатки, рабочим давлением и рабочей скоростью, что позволяет обеспечить специальный режим работы турбины в некотором диапазоне температур, давлений и скоростей, регули-

ру, снижая или устраняя эрозию, возникающую из-за ударов твердых частиц или химической деструкции турбинных лопаток. В частности, в турбинные лопатки может быть введена транспирационная защита путем пропускания через них транспирационной текучей среды (например рециклированного рабочего тела). Такая транспирационная защита может включать охлаждение лопаток, зависящее от температуры используемой транспирационной текучей среды. Так как турбинные лопатки могут вращаться со значительно меньшей скоростью по сравнению с турбинными лопатками в обычных системах выработки энергии, изобретение может обеспечить снижение эрозии, увеличение срока службы лопаток и снижение требований, предъявляемых к лопаткам. Более того, предлагаемые в изобретении турбины могут действовать с большей эффективностью (повышенным КПД) и при более низких температурах, что дает возможность снижения эксплуатационных затрат, продления межремонтного периода и снижения расхода топлива.

В одном из вариантов выполнения обеспечен способ выработки энергии. Способ может включать введение топлива,  $O_2$  и транспирационной текучей среды на основе  $CO_2$  в камеру сгорания, сжигание топлива в камере сгорания с обеспечением потока продуктов горения, содержащего циркулирующую текучую среду и некоторое количество твердых частиц и проходящего с определенной скоростью, и расширение потока продуктов горения в турбине, содержащей группу турбинных лопаток, с целью выработки энергии и получения выходного потока турбины, при этом при работе турбины турбинные лопатки вращаются со скоростью, меньшей приблизительно 500 миль/ч (223,5 м/с).

Способ может включать пропускание выходного потока турбины через фильтр, выполненный так, чтобы удалять в основном все твердые частицы, содержащиеся в выходном потоке турбины, и формировать отфильтрованный выходной поток турбины. Способ может также включать пропускание отфильтрованного выходного потока турбины через теплообменник с обеспечением охлажденного выходного потока турбины, обработку охлажденного выходного потока турбины с отведением одного или нескольких компонентов выходного потока турбины и пропускание обработанного выходного потока турбины обратно через теплообменник с обеспечением потока нагретой, рециклированной циркулирующей текучей среды. Способ дополнительно может включать направление по меньшей мере части потока нагретой, рециклированной циркулирующей текучей среды в камеру сгорания. Кроме того, способ может включать направление по меньшей мере части потока нагретой, рециклированной циркулирующей текучей среды в турбину. Способ может также включать направление по меньшей мере части потока нагретой, рециклированной циркулирующей текучей среды в блок очищающего материала, в котором поток нагретой, рециклированной циркулирующей текучей среды соединяется с очищающим материалом, формируя поток очищающего материала, в котором очищающий материал сконфигурирован так, чтобы удалять отложения на турбинных лопатках, образовавшиеся из-за присутствия твердых частиц в потоке продуктов горения.

Поток очищающего материала может вводиться непосредственно в турбину. Кроме того, поток очищающего материала может соединяться с потоком продуктов горения, формируя объединенный поток продуктов горения и очищающего материала, который может быть направлен в турбину. Циркулирующая текучая среда может содержать  $CO_2$ , который может быть обеспечен в сверхкритическом состоянии. Способ может дополнительно включать соединение отфильтрованного выходного потока турбины с сыпучим твердым топливом с формированием добавочного топлива в виде суспензии и введение добавочного топлива в камеру сгорания. Способ может также включать использование по меньшей мере части рециклированной циркулирующей текучей среды в качестве транспирационной текучей среды. Использование рециклированной циркулирующей текучей среды в качестве транспирационной текучей среды может включать просачивание транспирационной текучей среды в направлении внешней поверхности турбинных лопаток. Просачивание транспирационной текучей среды к внешней поверхности турбинных лопаток может включать просачивание транспирационной текучей среды сквозь пористый спеченный материал.

В другом варианте выполнения обеспечена система выработки энергии. Система выработки энергии может включать камеру сгорания, выполненную так, чтобы принимать топливо,  $O_2$  и циркулирующую текучую среду, и имеющую по меньшей мере одну стадию (ступень) горения, на которой сжигается топливо и обеспечивается поток продуктов горения, содержащий циркулирующую текучую среду и некоторое количество твердых частиц, турбину, сообщающуюся (связанную по текучей среде) с камерой сгорания и имеющую входную часть, служащую для приема потока продуктов горения, и выходную часть, служащую для выпуска выходного потока турбины, а также группу турбинных лопаток размером, достаточным для того, чтобы турбина работала при скорости лопаток, меньшей приблизительно 500 миль/ч (223,5 м/с), и фильтр, сообщающийся с выходной частью турбины и выполненный так, чтобы выдавать отфильтрованный выходной поток турбины.

Система выработки энергии может включать теплообменник, сообщающийся с фильтром и выполненный так, чтобы принимать отфильтрованный выходной поток турбины. Система выработки энергии может также включать блок очищающего материала, сообщающийся с теплообменником и выполненный так, чтобы объединять очищающий материал с потоком текучей среды, поступающим с теплообменника, формируя поток очищающего материала. Система выработки энергии может дополнительно включать

смесительный переключатель потока, выполненный так, чтобы объединять поток очищающего материала с потоком продуктов горения, формируя объединенный поток продуктов горения и очищающего материала, и направлять объединенный поток продуктов горения и очищающего материала в турбину.

Лопатки могут содержать пористый спеченный материал, который может быть скомпонован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности турбинных лопаток. Пористый спеченный материал может формировать всю внешнюю поверхность турбинных лопаток. Кроме того, турбина может включать ротор, который может содержать пористый спеченный материал, который может быть скомпонован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности ротора.

В другом варианте выполнения обеспечен способ выработки энергии. Способ может включать введение топлива,  $O_2$  и транспирационной текучей среды на основе  $CO_2$  в камеру сгорания, сжигание топлива с обеспечением потока продуктов горения, содержащего  $CO_2$ , расширение потока продуктов горения в турбине с целью выработки энергии и получения выходного потока турбины, обработку выходного потока турбины с повторным использованием по меньшей мере части циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в камере сгорания и использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды.

Использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды может включать транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в турбине. Использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды может включать транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в камере сгорания. Способ может включать направление потока продуктов горения из камеры сгорания через канал в турбину и использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды может включать транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в канале. Способ может также включать доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  до температуры, меньшей температуры потока продуктов горения. Способ может также включать доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  до температуры, равной температуре потока продуктов горения. Способ может также включать доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  до температуры, большей температуры потока продуктов горения.

Система выработки энергии обеспечена в другом варианте выполнения. Система может включать: камеру сгорания, выполненную так, чтобы принимать топливо,  $O_2$  и поток циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$ , и имеющую по меньшей мере одну стадию горения, на которой сжигается топливо в присутствии потока циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  с обеспечением потока продуктов горения, содержащего  $CO_2$ ; турбину, сообщающуюся с камерой сгорания и имеющую входную часть, служащую для приема потока продуктов горения, и выходную часть, служащую для выпуска выходного потока турбины, содержащего  $CO_2$ , а также группу турбинных лопаток, при этом поток продуктов горения воздействует на турбинные лопатки, вращая их и вырабатывая энергию; причем один или несколько компонентов системы выполнены так, чтобы использовать часть потока рециклированной циркулирующей текучей среды в качестве транспирационной текучей среды.

Один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$ , могут содержать фильтр, теплообменник, сепаратор и(или) компрессор. Один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы использовать часть потока рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды, могут содержать пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы принимать проходящую сквозь него транспирационную текучую среду. Турбинные лопатки могут иметь высоту менее приблизительно 0,275 м. Турбина может содержать менее 2000 турбинных лопаток. Отношение длины турбины к среднему диаметру лопаток может составлять более 4.

В другом варианте выполнения обеспечено турбинное устройство. Устройство может содержать группу компонентов, включающую кожух, формирующий входную часть, выполненную так, чтобы принимать поток продуктов горения, и выходную часть. Компоненты могут также включать ротор, размещенный в кожухе, и группу лопаток, отходящих от ротора, при этом один или несколько компонентов содержат пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы направлять сквозь него транспирационную текучую среду.

Пористый спеченный материал может формировать всю внешнюю поверхность турбинных лопаток. Кожух может содержать пористый спеченный материал, который может быть скомпонован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внутренней поверхности кожуха. Ротор может содержать пористый спеченный материал, который может быть скомпонован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности ротора. Ротор может содержать узел формирования кольцевого потока (турбинный дивертер), приспособленный для направления потока продуктов горения вокруг ротора. Устройство может содержать входной канал, соединенный с входной частью кожуха и выполненный так, чтобы соединиться с выходной частью устройства камеры сгорания и принимать из нее поток продуктов горения, и входной канал может содержать пористый спеченный материал, который

может быть сконструирован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внутренней поверхности входного канала. Входная часть кожуха может быть выполнена так, чтобы соединиться непосредственно с выходной частью устройства камеры сгорания. Входная часть кожуха может быть выполнена так, чтобы принимать поток продуктов горения от группы камер сгорания, размещенных по радиусу относительно главной оси, сформированной ротором.

Лопатки могут содержать пористый спеченный материал, который может быть сконструирован так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности лопаток. Лопатки могут содержать по меньшей мере один элемент жесткости. Элемент жесткости может содержать стержень, проходящий сквозь пористый спеченный материал в каждой турбинной лопатке. Элемент жесткости может содержать сердцевину, и пористый спеченный материал может размещаться вокруг сердцевины. В сердцевине могут быть сформированы один или несколько каналов, выполненных так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять транспирационную текучую среду в пористый спеченный материал. В лопатках могут быть сформированы один или несколько каналов, выполненных так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее в пористый спеченный материал. Каждая из лопаток может простираться от входной кромки к выходной кромке, и лопатки могут быть выполнены так, чтобы формировать поток транспирационной текучей среды у входной кромки, который больше потока транспирационной текучей среды у выходной кромки. В каждой из турбинных лопаток может быть сформирована поверхность поступления транспирационной текучей среды у входной кромки, большая, чем поверхность поступления текучей среды у выходной кромки. В каждой из лопаток может быть сформирована стенка, толщина которой у выходной кромки больше, чем у входной кромки. Каждая из лопаток может простираться от хвостовика до вершины (конца), и в пористом спеченном материале может быть сформирована пористость, меняющаяся между хвостовиком и вершиной. Пористость пористого спеченного материала может быть сформирована так, чтобы поток транспирационной текучей среды у вершины был больше потока транспирационной текучей среды у хвостовика. Пористость пористого спеченного материала может быть сформирована так, чтобы поток транспирационной текучей среды у вершины был в основном равен потоку транспирационной текучей среды у хвостовика. Пористый спеченный материал может быть сформирован в несколько слоев, пористость которых возрастает от хвостовика к вершине. Каждая из лопаток может быть сформирована как цельковая конструкция с группой внутренних ребер.

Компоненты турбинного устройства могут включать группу статоров, содержащих пористый спеченный материал, сконструированный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности статоров. Турбинное устройство может содержать одно или несколько уплотнений, причем один или несколько компонентов выполнены так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к уплотнениям. Уплотнения могут содержать пористый спеченный материал.

Турбинное устройство обеспечено в другом варианте выполнения. Устройство может содержать группу компонентов, включающую кожух, формирующий входную часть, выполненную так, чтобы принимать поток продуктов горения, и выходную часть. Устройство может содержать ротор, размещенный в кожухе, и группу лопаток, отходящих от ротора, при этом отношение длины турбинного устройства к среднему диаметру группы лопаток больше 4.

Турбинные лопатки могут иметь высоту менее приблизительно 0,275 м. Турбинное устройство может содержать менее 2000 турбинных лопаток. Лопатки могут иметь транспирационную защиту. Кроме того, лопатки содержат пористый спеченный материал, сконструированный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности лопаток.

Другие частные варианты выполнения настоящего изобретения и их преимущества станут ясны из нижеследующего.

#### **Краткое описание чертежей**

Далее изобретение рассмотрено более детально со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых показано следующее:

на фиг. 1 - блок-схема цикла сжигания и системы, предлагаемых в одном из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 2 - блок-схема цикла сжигания и системы, предлагаемых в другом иллюстративном варианте выполнения;

на фиг. 3 - сечение камеры сгорания, предлагаемой в одном из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 4 - сечение турбины, содержащей входной канал и предлагаемой в одном из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 5 - продольное сечение турбины и группы расположенных по радиусу камер сгорания согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 6 - поперечное сечение турбины и системы камер сгорания с фиг. 5;

на фиг. 7 - поперечное сечение турбинной лопатки, содержащей сердцевину, согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 8 - частичное сечение входного канала, содержащего первый и второй слои согласно одно-

му из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 9 - частичное сечение входного канала, содержащего четыре слоя согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 10 - сечение, проведенное между входной и выходной кромками турбинной лопатки, включающее стержни жесткости и каналы, выполненные так, чтобы принимать транспирационную текучую среду согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 11 - сечение, проведенное между входной и выходной кромками турбинной лопатки, включающее выполненные воедино внутренние ребра, формирующие каналы, скомпонованные так, чтобы принимать транспирационную текучую среду согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 12 - сечение, проведенное между вершиной и основанием турбинной лопатки с фиг. 11;

на фиг. 13 - вид в перспективе турбинной лопатки с фиг. 11;

на фиг. 14 - сечение, проведенное между входной и выходной кромками турбинной лопатки, на котором отражена разница в толщинах материала между входной кромкой и выходной кромкой согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 15А - частичное сечение, проведенное между хвостовиком и вершиной турбинной лопатки и включающее слои материала, формирующие разную пористость между корнем и вершиной согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 15Б - частичное сечение, проведенное между хвостовиком и вершиной турбинной лопатки и отражающее перепад пористости между корнем и вершиной согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 16 - расчетная траектория движения частицы в турбине согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 17 - графическое представление расстояния радиального перемещения твердых частиц в потоке продуктов горения в камере сгорания в функции от расстояния осевого перемещения согласно одному из иллюстративных вариантов выполнения;

на фиг. 18 - продольное сечение обычной турбины, используемой в работающей на природном газе типовой силовой установке;

на фиг. 19 - продольное сечение предлагаемой в иллюстративных вариантах выполнения турбины, которая меньше по размерам обычной турбины.

#### **Осуществление изобретения**

Далее изобретение рассмотрено более подробно со ссылкой на различные варианты выполнения. Эти варианты выполнения показаны так, чтобы данное описание было полным и законченным и в полной мере представляло объем изобретения для специалиста в данной области техники. Действительно, изобретение может быть реализовано во многих различных формах и не должно рассматриваться как ограниченное приведенными ниже частными вариантами выполнения, тем более что эти частные варианты представлены так, чтобы данное описание удовлетворяло всем действующим нормативным требованиям.

В данном описании и прилагаемой формуле изобретения формы единственного числа включают множественные объекты, если контекст ясно не подсказывает иное.

Настоящее изобретение в одном из вариантов его выполнения относится к конструкциям турбинных лопаток и способам их использования, которые могут снизить и даже устранить эрозию турбинных лопаток, связанную с химической деструкцией под действием воздуха или пара, а также ударами частиц. Изобретение также представляет способы и системы выработки энергии, которые могут обеспечить высокий КПД при одновременном снижении или даже устранении эрозии турбинных лопаток, связанной с воздействием микрочастиц, содержащихся в потоке продуктов горения, при отсутствии требования его фильтрации перед прохождением через турбину. Снижение и(или) устранение эрозии лопаток может упростить системы выработки энергии и расширить возможности использования исходного сырья, так как это позволяет турбинам действовать при потоках продуктов горения с повышенной общей концентрацией частиц и, таким образом, обеспечивает особые преимущества, связанные с использованием в процессе горения исходного сырья, например угля, дающего относительно высокие концентрации микрочастиц в продуктах горения.

Термины "микрочастицы" и "частицы" (включая такие термины в форме единственного числа), используемые в отношении компонентов потока продуктов горения и, в частности, охватывающие твердые и жидкие материалы, присутствующие в потоке продуктов горения и имеющие относительно малый размер отдельного элемента, должны пониматься как параметры частиц, особенно в сравнении с общим объемом потока продуктов горения. В некоторых вариантах выполнения частицы или микрочастицы могут включать любой содержащийся в продуктах горения материал, который находится не в газообразном состоянии. Жидкие частицы, в частности, могут охватывать материалы, которые находятся в жидком состоянии при температуре потока продуктов горения, но находятся в твердом состоянии при температуре, которая ниже температуры потока продуктов горения, например, по меньшей мере приблизительно на 10°C, по меньшей мере приблизительно на 15°C, по меньшей мере приблизительно на 20°C, по меньшей мере приблизительно на 30°C, по меньшей мере приблизительно на 50°C или по меньшей мере при-

близительно на 100°C. Такие жидкие частицы могут иметь точку затвердевания, соответствующую по меньшей мере температуре окружающей среды, по меньшей мере приблизительно 40°C, по меньшей мере приблизительно 50°C, по меньшей мере приблизительно 60°C, по меньшей мере приблизительно 80°C, по меньшей мере приблизительно 100°C или по меньшей мере приблизительно 200°C. В частных вариантах выполнения жидкие частицы могут иметь температуру затвердевания, попадающую в любой промежуток между вышеперечисленными температурами (например, в диапазон между температурой, лежащий по меньшей мере на 10°C ниже температуры потока продуктов горения, и по меньшей мере температурой окружающей среды).

В частных вариантах выполнения в настоящем изобретении подразумевается, что разрушение от ударов частиц о турбинную лопатку связано со скоростью лопатки. В частности, интенсивность разрушения, связанного с ударами частиц, может меняться приблизительно как возведенная в куб скорость лопатки относительно скорости частицы. При этом стандартная частота переменного тока в США составляет 60 Гц. Кроме того, в системах выработки энергии в США обычно используются синхронные генераторы переменного тока, работающие или при 1800 об/мин (30×60 Гц) или при 3600 об/мин (60×60 Гц), хотя должно быть понятно, что скорость турбины может лежать в других диапазонах угловых скоростей. В связи с этим в других странах могут использоваться другие стандартные частоты переменного тока. Например, в Великобритании работает на частоте 50 Гц. Кроме того, в генераторных системах могут использоваться генераторы постоянного тока на постоянных магнитах, работающие на любой скорости, так что постоянный ток преобразуется в переменный ток с требуемой частотой. Соответственно должно быть понятно, что рассмотренные в данном описании частоты приведены исключительно в качестве примера.

Однако известные газовые турбины, используемые в способах и системах выработки энергии, включающих синхронные генераторы переменного тока, обычно работают при скоростях лопаток, равных 600 миль/ч (268 м/с) или более. При скоростях лопаток, типичных для существующих паровых и газовых турбин, присутствие даже очень малых микрочастиц в потоке продуктов горения может вызвать эрозию лопаток. Однако в данном изобретении подразумевается способность преодоления эрозии лопаток за счет изменения их конструкции и режима работы, обеспечивающего снижение скорости лопаток. В частных вариантах выполнения скорость лопатки согласно настоящему изобретению может составлять приблизительно от 20 до 340 м/с у вершины лопатки. Точнее сказать, скорость лопатки может быть ниже 200 м/с, ниже 100 м/с или лежать в диапазоне приблизительно от 50 до 75 м/с. В одном из вариантов выполнения в изобретении может обеспечиваться работа турбины при скорости лопатки, которая приблизительно в 3 раза ниже обычной (то есть 200 миль/ч (89 м/с)), что может привести к снижению скорости эрозии лопатки в 27 раз или более. В одном из вариантов выполнения скорость лопаток, составляющая 150 миль/ч (67 м/с), то есть в четыре раза ниже обычных скоростей лопаток, может обеспечить приблизительно 64-кратное снижение интенсивности разрушения лопаток.

В системе выработки энергии возможность работы турбины на сниженной скорости может определяться рядом факторов, которые могут выполняться или по-отдельности или в сочетании нескольких факторов. Например, турбинные лопатки могут быть сконструированы с размерами, обеспечивающими возможность снижения скорости лопатки до значения, при котором удар частицы не приводит больше к появлению эрозии турбинной лопатки. В частности, рабочая скорость лопатки может быть снижена ниже критической скорости, при которой происходит эрозия. При этом скорость лопатки в любой ее заданной точке определяется следующей формулой:

$$v = (\text{rpm}/60) * 2 * \pi * r \quad (\text{Формула 1}),$$

где

$v$  = скорость лопатки (м/с),

rpm = число оборотов за минуту,

$\pi$  = число  $\pi$  и

$r$  = расстояние (в метрах) между центром вращения и точкой на лопатке, в которой должна быть определена скорость лопатки (например, радиус).

Кроме того, следует отметить, что скорость лопатки у ее вершины выражается следующей формулой:

$$v_t = (\text{rpm}/60) * 2 * \pi * (a+b) \quad (\text{Формула 2}),$$

где

$v_t$  = скорость лопатки (м/с) у ее вершины,

rpm = число оборотов за минуту,

$\pi$  = число  $\pi$ ,

$a$  = радиус (м) ротора у лопатки и

$b$  = высота лопатки (м).

Таким образом максимальная скорость каждой лопатки может быть снижена путем уменьшения расстояния, на которое лопатки выступают от центра ротора. Как рассмотрено далее, использование турбин с лопатками, выступающими на относительно малые радиусы, может быть осуществлено при использовании сверхкритической текучей среды, имеющей относительно высокую плотность потока и на-

ходящейся под высоким давлением, и при сниженной скорости потока в турбине, предлагаемой в настоящем изобретении. Кроме того, применение в турбине рабочего тела высокой плотности может обеспечить значительное снижение температуры турбинных лопаток за счет повышения возможности использования транспирации для их охлаждения.

Высота лопатки (то есть расстояние от хвостовика у внешней поверхности вала турбины - например, ротора - до вершины лопатки) предпочтительно составляет менее приблизительно 0,275 м. В частных вариантах выполнения средняя высота лопатки может составлять приблизительно от 0,05 до 0,25 м, приблизительно от 0,075 до 0,225 м, приблизительно от 0,1 до 0,2 м или приблизительно от 0,125 до 0,175 м. В частных вариантах выполнения реальные высоты лопаток могут меняться от входа турбины до выхода турбины. Например, высота лопатки у входа турбины может быть меньше средней высоты и увеличиваться в направлении выхода, так что высота лопатки у выхода становится больше средней. Средняя ширина лопатки может составлять приблизительно от 0,025 до 0,125 м, приблизительно от 0,04 до 0,11 м, приблизительно от 0,05 до 0,1 м или приблизительно от 0,06 до 0,09 м. В других вариантах выполнения высота и ширина лопатки могут иметь другие размеры, позволяющие работать на скоростях, приведенных в данном описании.

Предлагаемые в данном изобретении турбины и способы их работы могут также отличаться общими размерами турбины. Например, предлагаемая в настоящем изобретении турбина может иметь общую длину менее приблизительно 11 м, менее приблизительно 10 м или менее приблизительно 9 м. В других вариантах выполнения общая длина турбины может составлять приблизительно от 6 до 10 м, приблизительно от 6,5 до 9,5 м, приблизительно от 7 до 9 м или приблизительно от 7,5 до 8,5 м. Например, предлагаемая в настоящем изобретении турбина может иметь средний диаметр менее приблизительно 3,5 м, менее приблизительно 3 м или менее приблизительно 2,5 м. В других вариантах выполнения средний диаметр турбины может составлять приблизительно от 0,25 до 3 м, приблизительно от 0,5 до 2 м или приблизительно от 0,5 до 1,5 м. Отношение длины турбины к среднему диаметру турбины (то есть диаметру турбинных лопаток) может быть более приблизительно 3,5, более приблизительно 4, более приблизительно 4,5 или более приблизительно 5. В частных вариантах выполнения отношение длины турбины к среднему диаметру турбины может составлять приблизительно от 3,5 до 7,5, приблизительно от 4 до 7, приблизительно от 4,5 до 6,5 или приблизительно от 5 до 6. Приведенные выше величины могут относиться, в частности, к общей длине турбины. В некоторых вариантах выполнения общая длина может относиться к длине корпуса от входа до выхода. В конкретных вариантах выполнения общая длина может относиться к расстоянию внутри корпуса от турбинной лопатки, находящейся непосредственно у входа, до турбинной лопатки, находящейся непосредственно у выхода.

Аналогично предлагаемые в изобретении турбины и способы действия могут отличаться средним радиусом лопаток (расстоянием от центра ротора до вершины турбинной лопатки). Предпочтительно турбины работают при среднем радиусе лопаток менее приблизительно 1,2 м, менее приблизительно 1,1 м, менее приблизительно 1 м, менее приблизительно 0,9 м, менее приблизительно 0,8 м, менее приблизительно 0,7 м или менее приблизительно 0,6 м. В частности, радиусы лопаток могут составлять приблизительно от 0,25 до 1 м, приблизительно от 0,275 до 0,8 м, приблизительно от 0,3 до 0,7 м, приблизительно от 0,325 до 0,6 м, приблизительно от 0,35 до 0,5 м или приблизительно от 0,375 до 0,475 м.

В некоторых вариантах выполнения турбина, эффективная с точки зрения настоящего изобретения, может иметь общее количество турбинных лопаток, существенно меньшее, чем в обычных системах с газовыми турбинами. В частности, предлагаемые в изобретении турбины могут иметь менее приблизительно 3000 лопаток, менее приблизительно 2500 лопаток или менее приблизительно 2000 лопаток. В других вариантах выполнения количество лопаток в турбине может составлять приблизительно от 500 до 2500, приблизительно от 750 до 2250 приблизительно от 1000 до 2000 или приблизительно от 1250 до 1750.

В некоторых вариантах выполнения предлагаемые в настоящем изобретении турбины могут обеспечивать, в частности, высокоэффективную выработку энергии при сниженной скорости лопаток за счет действия при значительно увеличенном входном давлении, и(или) значительно увеличенном выходном давлении, и(или) значительно увеличенном перепаде давления от входа к выходу по сравнению с обычными системами выработки энергии с газовыми турбинами. В частных вариантах выполнения турбина может работать при входном давлении, составляющем по меньшей мере приблизительно 25 бар (2,5 МПа), по меньшей мере приблизительно 50 бар (5 МПа), по меньшей мере приблизительно 100 бар (10 МПа), по меньшей мере приблизительно 150 бар (15 МПа), по меньшей мере приблизительно 200 бар (20 МПа) или по меньшей мере приблизительно 250 бар (25 МПа). В других вариантах выполнения входное давление может составлять приблизительно от 50 бар (5 МПа) до 500 бар (50 МПа), приблизительно от 100 бар (10 МПа) до 450 бар (45 МПа), приблизительно от 150 бар (15 МПа) до 400 бар (40 МПа), приблизительно от 200 бар (20 МПа) до 400 бар (40 МПа) или приблизительно от 250 бар (25 МПа) до 350 бар (35 МПа).

В других вариантах выполнения турбина может работать при выходном давлении, составляющем по меньшей мере приблизительно 5 бар (0,5 МПа), по меньшей мере приблизительно 10 бар (1 МПа), по меньшей мере приблизительно 15 бар (1,5 МПа), по меньшей мере приблизительно 20 бар (2 МПа) или по меньшей мере приблизительно 25 бар (2,5 МПа). В частности, выходное давление может составлять

приблизительно от 10 бар (1 МПа) до 50 бар (5 МПа), приблизительно от 15 бар (1,5 МПа) до 45 бар (4,5 МПа), приблизительно от 20 бар (2 МПа) до 40 бар (4 МПа) или приблизительно от 25 бар (2,5 МПа) до 35 бар (3,5 МПа).

В других вариантах выполнения отношение входного давления турбины к выходному давлению турбины может составлять по меньшей мере приблизительно 6, по меньшей мере приблизительно 7, по меньшей мере приблизительно 8, по меньшей мере приблизительно 9 или по меньшей мере приблизительно 10. В частных вариантах выполнения отношение входного давления турбины к выходному давлению турбины может составлять приблизительно от 6 до 15, приблизительно от 7 до 14, приблизительно от 8 до 12 или приблизительно от 9 до 11.

В других вариантах выполнения предлагаемые в настоящем изобретении турбины могут работать в системе выработки энергии при значительно большей плотности потока по сравнению с работой турбин в обычных системах выработки энергии. Например, предлагаемые в изобретении турбины могут работать при плотности потока, составляющей по меньшей мере приблизительно  $20 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $50 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $100 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $150 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $200 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $300 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $400 \text{ кг/м}^3$ , по меньшей мере приблизительно  $500 \text{ кг/м}^3$  или по меньшей мере приблизительно  $600 \text{ кг/м}^3$ .

В противоположность предлагаемым в настоящем изобретении существующие газотурбинные компрессоры могут действовать при выходных давлениях, составляющих приблизительно от 1 бар (0,1 МПа) до 15 бар (1,5 МПа), при плотностях газа в компрессорной секции, составляющих от  $1 \text{ кг/м}^3$  до приблизительно  $15 \text{ кг/м}^3$  (в предположении адиабатического нагрева при сжатии). Эрозия и другие проблемы в компрессоре могут быть незначительными из-за относительно низких температур в нем. Однако в горячей секции температура газа может изменяться от пикового значения, приблизительно равного  $1727^\circ\text{C}$ , приблизительно до  $527^\circ\text{C}$ . Плотность газа в горячей секции может меняться от высокой, составляющей приблизительно  $5 \text{ кг/м}^3$ , до низкой, составляющей приблизительно  $0,5 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, условия внутри существующих турбин могут существенно отличаться от условий внутри предлагаемых в настоящем изобретении турбин.

Использование повышенных давлений при пониженных скоростях потока и повышенных температурах может привести к увеличению крутящего момента на турбинных лопатках. Соответственно турбина может содержать средства, предназначенные для снижения крутящего момента на лопатках. В частности, турбина может содержать большее число лопаток, дисков и(или) ступеней по сравнению с турбинами обычного типа, что распределяет крутящий момент между ними, снижая его в приложении к отдельным лопаткам. Кроме того, лопатки могут иметь угол атаки, способствующий развитию меньшего усилия и крутящего момента на лопатках. В частности, лопатки могут быть выполнены с пониженным углом атаки по отношению к потоку через турбину, что дает меньшее аэродинамическое сопротивление и увеличивает отношение аэродинамической подъемной силы к аэродинамическому сопротивлению. Соответственно эти средства могут снижать крутящий момент, прикладываемый к каждой лопатке, так чтобы они могли быть выполнены из относительно менее прочных и относительно менее дорогих материалов.

В некоторых вариантах выполнения эрозия лопаток может контролироваться, снижаться или устраняться за счет сочетания вышеописанных подходов с одним или несколькими способами охлаждения лопаток. Любой из способов охлаждения турбинных лопаток может быть использован в сочетании с настоящим изобретением, включая транспирационное охлаждение лопаток, как более подробно описано далее. При этом транспирационное охлаждение может быть применено для охлаждения различных компонентов турбины, камеры сгорания и связанных с ними устройств, раскрытых в данном описании. Особенно это относится к турбине, корпусу, статору (например статорным лопаткам), уплотнениям, лопаткам (например турбинным лопаткам), ротору и различным другим внутренним компонентам, в которых может быть использовано транспирационное охлаждение, например за счет применения пористых материалов, приведенных в данном описании. Поэтому статоры могут содержать пористые спеченные материалы, которые могут быть выполнены так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности статоров. Кроме того, одна или несколько турбинных компонентов могут быть выполнены так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к уплотнениям. В некоторых вариантах выполнения уплотнения могут содержать спеченные материалы. Примеры уплотнений и статоров, в которых может быть использовано транспирационное охлаждение в соответствии с настоящим изобретением, раскрыты в патентной публикации US 2009/0142187, содержание которой целиком включено в данную заявку путем ссылки. Однако согласно настоящему изобретению транспирационное охлаждение может быть также применено и в других различных компонентах турбин, камер сгорания и связанных с ними устройств.

Кроме того, технология транспирационного охлаждения, раскрытая в данном изобретении, может обеспечивать улучшенное охлаждение по сравнению с существующими технологиями транспирационного охлаждения. В настоящее время охлаждение лопаток обычно выполняется за счет воздуха, отобранного от компрессора турбины. Этот воздух имеет ограниченную теплоемкость из-за относительно низкой плотности (например  $0,5\text{-}5 \text{ кг/м}^3$ ), обусловленной относительно низким рабочим давлением в горячей

секции существующих турбин, как описано выше. Это ограничивает скорости теплопередачи. Напротив, как рассмотрено далее, настоящее изобретение предусматривает транспирационное охлаждение путем использования  $\text{CO}_2$ , который может обеспечить улучшенную теплопередачу.

Скорости теплопередачи в существующих вариантах турбин ограничены также относительно большими нагрузками на турбинные лопатки, обусловленными большой их длиной, приводящей к возникновению больших центробежных сил при вращении лопаток. Поэтому в существующих турбинах каналы охлаждения должны сохраняться относительно малыми и не должны занимать больше, чем относительно малая часть общего поперечного сечения лопатки, чтобы ограничить снижение продольной прочности лопаток, связанное с наличием каналов охлаждения.

Предлагаемые в изобретении турбины особенно эффективны в системах и способах выработки энергии, так как эти турбины не только обеспечивают снижение эрозии лопаток, но также могут существенно снизить общую стоимость турбины. В частных вариантах выполнения общая стоимость турбины, по сравнению с турбинами, используемыми в обычных системах выработки энергии, может быть снижена по меньшей мере на 20, по меньшей мере на 30, по меньшей мере на 40, по меньшей мере на 50, по меньшей мере на 60, по меньшей мере на 70 или по меньшей мере на 75% без значительных потерь выходной электрической мощности (то есть менее 5, менее 4, менее 3, менее 2, менее 1 или менее 0,8%). Снижение стоимости может быть связано с отсутствием необходимости в использовании жаропрочных сплавов и(или) дорогих материалов для лопаток благодаря, например, уменьшению действующих на них центробежных сил. Кроме того, снижение выходной электрической мощности может быть сведено к минимуму, несмотря на уменьшение скорости вращения, благодаря использованию в турбине высоких входных температур, а также высоких рабочих давлений по сравнению с существующими турбинами.

В частных вариантах выполнения настоящее изобретение может включать системы и способы выработки энергии, в которые могут входить существующие конструкции турбинных лопаток и способы действия. Например, предлагаемые системы и способы дают возможность выработки энергии за счет использования работающих на высокоэффективном топливе камер сгорания (например камер сгорания с транспирационным охлаждением) опционно с соответствующей циркулирующей текучей средой (например циркулирующей текучей средой на основе  $\text{CO}_2$ ). В частности, использование циркулирующей текучей среды под высоким давлением (или рабочего тела) с большим коэффициентом рециклирования  $\text{CO}_2$  обеспечивает возможность направления части циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  к турбинным лопаткам для транспирационного охлаждения.

Сочетание транспирационного охлаждения с конструкциями лопаток и режимами работы согласно настоящему изобретению может быть особенно полезным, так как эрозия может зависеть от температуры турбинных лопаток и состава материала лопаток. Сочетание конструкции турбинной лопатки и действия при рабочей температуре лопаток может обеспечить широкий диапазон возможных рабочих скоростей лопаток и рабочих температур лопаток при контролируемой, сниженной или устраненной эрозии. При пониженной температуре лопаток уменьшается эрозия, и скорость, при которой начинается эрозия, может быть больше. Возможность выбора рабочих режимов имеет то преимущество, что может стать допустимым использование металлических сплавов, способных противостоять эрозии при больших скоростях лопаток, но с другой стороны не пригодных для использования при повышенных рабочих температурах. В этом отношении при пониженных температурах высокопрочные стали относительно не восприимчивы к ударным повреждениям. В качестве примера, прокатанная однородная броня, используемая в военных средствах передвижения, не повреждается твердыми стальными пулями, летящими со скоростью вплоть до 400 миль/ч (179 м/с).

Однако в других вариантах выполнения, как более полно описано далее, транспирация может служить для защиты лопаток путем предотвращения затвердевания компонентов потока продуктов горения (например жидкого шлака). В таких вариантах транспирационное охлаждение может быть выполнено как охлаждение лопаток (и(или) других компонентов) до температуры ниже температуры потока продуктов горения. В частности, такое охлаждение может производиться до нижнего предела, которой выше температуры, при которой компонент потока продуктов горения (например жидкий шлак) застынет (или затвердеет) и поэтому осядет на турбинных лопатках. Например, размягчение может начаться при  $590^\circ\text{C}$  и плавление может происходить при  $870^\circ\text{C}$ . Без транспирационного охлаждения турбина должна бы действовать при температуре значительно ниже  $590^\circ\text{C}$ , чтобы избежать нарастания шлака на лопатках, что слишком низко для эффективной работы. При наличии транспирационной защиты турбина может действовать при температуре, значительно выше  $870^\circ\text{C}$ , когда шлак находится в жидком состоянии, но жидкие включения не касаются поверхности или не прикрепляются к ней благодаря транспирационному слою, покрывающему в основном все поверхности, находящиеся внутри турбины и поэтому подверженные контакту с компонентами потока, проходящего через турбину (например внутренняя поверхность корпуса турбины, внешние поверхности турбинных лопаток, установленных в турбине, и т.п.). Поэтому транспирационная защита может снизить или устранить не только деградацию из-за механической эрозии за счет ударов частиц, но также химическую деградацию путем поддержания лопаток в более холодном состоянии и путем замены воздуха или паровоздушной смеси в качестве охладителя на  $\text{CO}_2$  в качестве охладителя в виде транспирационной текучей среды.

В некоторых вариантах выполнения для турбин может быть полезной работа при скоростях лопаток, сравнимых со скоростью потока продуктов горения. В таких вариантах выполнения может быть практическое преимущество в том, чтобы скорость была существенно ниже скоростей потока при типичном процессе горения. Например, согласно данному изобретению скорость потока может быть менее приблизительно 400 миль/ч (179 м/с), менее приблизительно 350 миль/ч (156 м/с), менее приблизительно 300 миль/ч (134 м/с), менее приблизительно 259 миль/ч (112 м/с), менее приблизительно 200 миль/ч (89 м/с), менее приблизительно 150 миль/ч (67 м/с) или менее приблизительно 100 миль/ч (45 м/с). Отношение скорости вершины лопатки к скорости потока предпочтительно составляет более 1, более 1,5, более 2, более 2,5 или более 3. В частности, отношение скорости вершины лопатки к скорости потока может составлять приблизительно от 1 до 5, приблизительно от 1,5 до 4,75, приблизительно от 1,75 до 4,5, приблизительно от 2 до 4,25 или приблизительно от 2,5 до 4.

В результате эрозии со временем может происходить ухудшение параметров турбины (например за счет снижения КПД и(или) выходной мощности). Например, у обычных турбин может происходить ухудшение рабочих параметров на 10% за период в два или три года. Капитальный ремонт с починкой турбины может стоить приблизительно 50% от продажной цены турбины. Соответственно, за 20 лет службы существующие турбины могут пройти капитальный ремонт в общем восемь раз, что может стоить в общем в четыре раза дороже первоначальной продажной цены турбины.

Это ухудшение может быть связано с эрозией, вызванной остаточными частицами пыли, прошедшими через систему фильтрации воздуха, установленную между камерой сгорания и турбиной. Увеличение эффективности удаления частиц фильтрами может не оказаться приемлемым вариантом, так как это может ограничить воздушный поток и снизить КПД турбины. Поэтому предлагаемые в настоящем изобретении турбины могут обеспечить значительную экономию по стоимости за счет сведения к минимуму или исключения необходимости в капитальных ремонтах путем минимизации или устранения повреждений за счет эрозии. При этом скорость рассеяния энергии удара, связанного со столкновением частиц с лопатками, приблизительно пропорциональна кубу их относительной скорости. При этом эрозия турбинных лопаток имеет тенденцию быть приблизительно пропорциональной скорости рассеяния энергии удара ("ударной мощности"), как показано ниже:

$$IP = kV^3/X \quad (\text{Формула 3})$$

где

IP = ударная мощность,

k = переменный коэффициент, зависящий от материала частиц, материала лопатки, окружающей температуры и угла удара,

v = относительная скорость между турбинными лопатками и частицами и

X = характеристическая длина ударного взаимодействия.

За счет снижения скорости лопаток и обеспечения транспирационной защиты удары могут быть минимизированы или уменьшены ниже порога, при котором происходит эрозия, при этом может быть также снижено или устранено химическое повреждение. Соответственно расходы, связанные с капитальными ремонтами, обусловленными наличием эрозии, могут быть уменьшены или устранены, и поэтому предлагаемые варианты выполнения турбин могут обеспечить значительную экономию затрат. Кроме того, как отмечалось выше, за счет устранения необходимости в использовании дорогостоящих жаропрочных сплавов турбины в соответствии с настоящим изобретением могут быть относительно менее дорогими по сравнению с существующими турбинами.

Для различных известных вариантов энергетических установок КПД критически зависит от входных температур турбины. Например, была проведена большая и дорогостоящая работа по созданию технологий турбин, в которых обеспечиваются входные температуры, достигающие 1350°C. Чем выше входная температура турбины, тем выше КПД энергетической установки, но тем дороже турбина и, возможно, короче срок ее службы. Из-за относительно высокой температуры потока продуктов горения для турбины может иметь преимущество, чтобы она была выполнена из материалов, способных выдерживать такие температуры. Может быть также полезным, чтобы турбина содержала материал, обеспечивающий высокую химическую стойкость по отношению к вторичным веществам, которые могут присутствовать в потоке продуктов горения.

В некоторых вариантах выполнения настоящее изобретение может практически обеспечить использование охлаждающей текучей среды для компонентов турбины. Как более полно описано далее, предлагаемые системы и способы дают возможность, например, выработки энергии за счет использования работающих на высокоэффективном топливе камер сгорания (например камер сгорания с транспирационным охлаждением) и соответствующей циркулирующей текучей среды (например циркулирующей текучей средой на основе CO<sub>2</sub>). В частности, часть циркулирующей текучей среды может направляться к турбинным компонентам, в особенности к турбинным лопаткам, для использования при охлаждении турбины, например транспирационном охлаждении.

Например, в некоторых вариантах выполнения часть циркулирующей текучей среды на основе CO<sub>2</sub> может быть отведена из цикла (например, из той части цикла, в которой циркулирующая текучая среда

имеет параметры, пригодные для текучей среды транспирационного охлаждения) и направлена в турбину для охлаждения ее компонентов, в особенности турбинных лопаток. Текучая среда охлаждения лопатки может выходить из отверстий (или перфораций) в турбинной лопатке и поступать непосредственно в турбинный поток. Следовательно, вместо использования воздуха в качестве текучей среды транспирационного охлаждения (которой свойственны ограничение по своей охлаждающей способности, как описано выше, и трудности в обеспечении безопасности) предлагаемые в изобретении способы и системы предусматривают использование больших количеств  $\text{CO}_2$  под высоким давлением, сверхкритического  $\text{CO}_2$  и даже жидкого  $\text{CO}_2$  в качестве среды охлаждения турбинных лопаток. Это высокоэффективно, так как во много раз повышает охлаждающую способность, направленную на турбинные лопатки, по сравнению с известными способами охлаждения лопаток. Изобретение высокоэффективно также благодаря тому, что циркулирующая текучая среда на основе  $\text{CO}_2$  может присутствовать в системе в очень больших количествах, что дает возможность пропускания очень больших количеств охлаждающей текучей среды через турбинные лопатки. Этот большой объем и(или) большой массовый поток охлаждающей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  через турбинные лопатки не только защищает турбинные лопатки от экстремально-го тепла, которое полезно с точки зрения способов высокоэффективной выработки энергии, но также способствует защите турбинных лопаток от коррозии и эрозии, связанных с воздействием высокотемпературных газов и не отфильтрованных частиц, проходящих через турбину, путем транспирации охлаждающей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , проходящей наружу через всю поверхность лопатки. В одном из вариантов выполнения транспирационное охлаждение может обеспечивать рабочие температуры лопаток приблизительно от 200 до 700°C несмотря на значительно более высокие температуры на входе турбины, описанные выше (например 1350°C), что может, таким образом, предоставить возможность использования турбинных лопаток из относительно менее дорогих материалов, чем те, которые применяются в настоящее время, и(или) возможность применения более высоких входных температур турбины, обеспечивающих более высокий КПД. Вышеупомянутые компоненты турбины с транспирационным охлаждением могут использоваться в любых способах и системах выработки энергии, в которых  $\text{CO}_2$  под высоким давлением (или другая текучая среда, менее коррозионная, чем воздух или пар, например  $\text{N}_2$ ) может быть сделан доступным как циркулирующая текучая среда с высоким коэффициентом рециклирования.

В частных вариантах выполнения использование циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в качестве среды охлаждения турбинных лопаток позволяет изготавливать турбинные лопатки из намного менее дорогих материалов, чем известные турбинные лопатки, используемые в способах высокоэффективной выработки энергии, так как использование охлаждающей среды на основе  $\text{CO}_2$  согласно настоящему изобретению предотвращает лопатки от нагрева до экстремальных температур охватывающим их потоком продуктов горения и снижает коррозионное и эрозийное воздействие на них этого потока. Например, в соответствии с настоящим изобретением турбинные лопатки могут изготавливаться из самых различных высокопрочных сталей и даже из относительно дешевых сталей. Аналогично лопатки могут изготавливаться из углеродных композитов или даже из низкотемпературных материалов, таких как алюминий. В соответствии с настоящим изобретением для изготовления компонентов турбины могут использоваться любые материалы, признанные в предшествующем уровне техники пригодными для применения в турбинных компонентах и даже в турбинах, используемых в условиях низких температур и(или) условиях низкой эрозии или коррозии.

Транспирационное охлаждение турбинных лопаток частью циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  согласно настоящему изобретению эффективно также из-за того, что оно может способствовать безопасному прохождению продуктов горения, содержащих шлак (или другие твердые частицы и(или) негорючие компоненты), через турбину без необходимости во введении стадии фильтрации и соответствующих компонентов. Это может в значительной мере упростить конструкцию оборудования для выработки энергии и расширить виды материалов, которые могут использоваться как источники топлива для процесса горения.

Использование циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в транспирационном охлаждении турбинных компонентов согласно настоящему изобретению имеет также преимущество в отношении термодинамики цикла выработки энергии. Благодаря очень высокой охлаждающей способности циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  по сравнению с известными транспирационными средами, используемыми для турбинных лопаток, становится возможной работа камеры сгорания при повышенных температурах без ограничений со стороны переносимости высоких температур турбиной. Поэтому в соответствии с настоящим изобретением камеры сгорания, способные работать при экстремально высоких температурах (например, камеры сгорания с транспирационным охлаждением), могут действовать при рабочих температурах, близких к максимальным, так как поток продуктов горения может проходить через турбину, охлаждаемую  $\text{CO}_2$ , без повреждения турбинных компонентов. Это потенциально увеличивает термодинамический КПД цикла выработки энергии, приближая его к 100%.

Любая комбинация конструкции турбинной лопатки, общей конструкции турбины и транспирационного охлаждения турбинных лопаток может быть использована в любом способе выработки энергии, в котором желательно продлить срок службы турбинных лопаток, например в способах и системах, в которых горение приводит к образованию твердых частиц. В некоторых вариантах выполнения способы и

системы могут быть, в частности, такими, в которых может использоваться циркулирующая текучая среда. Например,  $\text{CO}_2$  под высоким давлением может быть сделан пригодным для использования в качестве циркулирующей текучей среды с высоким коэффициентом рециклирования.

Например, описанная в данном изобретении турбина может использоваться в способе и системе, в которых циркулирующая текучая среда на основе  $\text{CO}_2$  подается в камеру сгорания вместе с соответствующим топливом, необходимым окислителем и соответствующими веществами, которые могут способствовать эффективному горению. Такие системы и способы могут включать камеру сгорания, действующую при очень высоких температурах (например в диапазоне приблизительно от 1600 до 3300°C или даже выше), и использование циркулирующей текучей среды, которая может уменьшать температуру потока текучей среды, выходящего из камеры сгорания, так, чтобы этот поток можно было использовать при преобразовании заключенной в нем энергии в электрическую. В частности, поток продуктов горения может расширяться по меньшей мере в одной турбине, производя энергию. Поток расширившегося газа может охлаждаться с целью удаления из него различных компонентов, таких как вода, и тепло, отведенное от расширившегося газового потока, может использоваться для нагрева циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ . Очищенный поток циркулирующей текучей среды может быть затем сжат и нагрет для повторного использования в камере сгорания. Иллюстративные системы выработки энергии и способы, которые могут включать предлагаемые в настоящем изобретении турбинные лопатки (при наличии соответствующего транспирационного охлаждения лопаток или без него), раскрыты в патентной публикации US 2011/0179799, содержание которой целиком включено в данную заявку путем ссылки.

Введение турбины в энергетический цикл горения согласно настоящему изобретению особенно эффективно при сжигании топлив, после которых образуются компоненты в виде частиц. Например, различные виды углей могут сжигаться в цикле выработки энергии с получением потока продуктов горения, содержащего шлак и(или) другие твердые частицы. Предпочтительно, чтобы, если турбина согласно настоящему изобретению введена в цикл горения, весь поток продуктов горения (то есть включая все твердые частицы) мог вводиться в турбину без необходимости в выполнении стадии предварительной фильтрации. Это дает возможность использования более высоких температур на входе турбины, что, в свою очередь, повышает эффективность горения в сравнении с процессами, требующими фильтрации продуктов горения до их прохождения через турбину. Согласно изобретению такая возможность имеется, так как предлагаемые в изобретении турбины могут подвергаться ударам твердых частиц без значительной эрозии. В таком случае материалы в виде твердых частиц могут быть отфильтрованы из потока, выходящего из турбины.

На фиг. 1 в виде блок-схемы представлен один из вариантов осуществления цикла горения, предлагаемого в настоящем изобретении. В представленном варианте выполнения обеспечен блок 100 разделения воздуха, забирающий окружающий воздух 10 и выдающий поток 120 обогащенного кислорода. Поток 120 кислорода может включать кислород с молярным содержанием по меньшей мере приблизительно 50%, по меньшей мере приблизительно 60, по меньшей мере приблизительно 70, по меньшей мере приблизительно 80, по меньшей мере приблизительно 85, по меньшей мере приблизительно 90 или по меньшей мере приблизительно 95%. Поток 120 кислорода может подаваться, например, из любой известной в предшествующем уровне техники системы (процесса), например из процесса криогенного разделения воздуха или из высокотемпературного процесса выделения кислорода на ионных мембранах (из воздуха). В частных вариантах выполнения обогащенный кислород может быть получен в процессе криогенного разделения воздуха, в котором кислород сжимается, то есть эффективно нагревается до температуры выше температуры внешней среды. Такая установка криогенной перекачки воздуха может иметь два компрессора, оба из которых могут работать в адиабатическом режиме без промежуточного охлаждения. В частных вариантах выполнения может быть эффективным включение компонентов, пригодных для отведения тепла, полученного в блоке разделения воздуха, и передачи этого тепла компонентам описываемой системы, в которые введение тепла необходимо.

Иллюстрируемый на фиг. 1 цикл может быть пригоден для сжигания любого топлива, при котором образуется вещество в виде частиц (например, шлак) как компонента продуктов горения. Не служащие ограничением примеры топлив, пригодных для использования согласно изобретению, включают различные марки и виды угля, дерево, нефть, битум из битумных песков, биомассу, горную смолу, водоросли, сортированные горючие твердые мусорные отходы, асфальт и использованные шины. В частности, в соответствии с изобретением может использоваться любой плотный топливный материал, и такие топлива особым образом могут быть измельчены, раздроблены или другим образом обработаны, чтобы уменьшить размеры частиц до приемлемых. При необходимости может быть добавлена псевдоожигающая или превращающая в суспензию среда для достижения должных кондиций и удовлетворения требований к потоку при его прокачке под высоким давлением. Например, как показано на фиг. 1, твердое топливо 15 может быть пропущено через мельничное устройство 200 для получения измельченного в порошок топлива. В других вариантах выполнения твердое топливо 15 может быть обеспечено в порошкообразном состоянии с целью устранения необходимости в локальном размоле. В частных вариантах выполнения твердое топливо 15 может иметь размер частиц приблизительно от 10 до 500 мкм, приблизительно от 25 до 400 мкм или приблизительно от 50 до 200 мкм. В других вариантах выполнения твердое топливо 15

может быть описано тем, что более 50, 60, 70, 80, 90, 95 или 99% частиц твердого топлива имеют средний размер частиц, составляющий менее приблизительно 500, 400, 300, 200 или 100 мкм.

Твердое топливо 15 может быть соответствующим образом обработано с целью обеспечения возможности впрыскивания его в устройство камеры сгорания с достаточной скоростью и под давлением, превышающим давление внутри камеры сгорания. Для обеспечения таких параметров твердое топливо 15 может находиться в виде жидкости, суспензии, геля или пасты с соответствующей текучестью и вязкостью при окружающих температурах или при повышенных температурах. Например, твердое топливо 15 может быть обеспечено при температурах приблизительно от 30 до 500°C, приблизительно от 40 до 450°C, приблизительно от 50 до 425°C или приблизительно от 75 до 400°C. Если твердое топливо 15 находится в размолотом, раздробленном или другим образом обработанном состоянии, так что размер частиц соответственно уменьшен, может быть добавлена при необходимости псевдоожигающая или превращающая в суспензию среда для обеспечения соответствующего вида и удовлетворения требований к потоку с точки зрения перекачки под высоким давлением. Как показано на фиг. 1, превращенное в частицы твердое топливо 220, полученное из твердого топлива 15 в мельничном устройстве 200, может быть смешано с псевдоожигающей субстанцией для обеспечения в виде суспензии. В частности, это твердое топливо 220 смешивается в смесителе 250 с боковым отводом 562 от рециклированного потока 561 циркулирующей текучей среды на основе CO<sub>2</sub>. Боковой отвод 562 диоксида углерода может быть обеспечен в сверхкритическом, высокоплотном состоянии. В частных вариантах выполнения CO<sub>2</sub>, используемый для формирования суспензии, может иметь плотность приблизительно от 450 до 1100 кг/м<sup>3</sup>. Если более детально, то боковой отвод 562 диоксида углерода может смешиваться с превращенным в частицы твердым топливом 220 с образованием суспензии 255, содержащей, например, приблизительно от 10 до 75 мас.% или приблизительно от 25 до 55 мас.% измельченного угля. Кроме того, CO<sub>2</sub> из бокового отвода 562, используемый для формирования суспензии 255, может иметь температуру ниже приблизительно 0°C, ниже приблизительно -10°C, ниже приблизительно -20°C или ниже приблизительно -30°C. В других вариантах выполнения CO<sub>2</sub> из бокового отвода 562, используемый для формирования суспензии 255, может иметь температуру приблизительно от 0 до -60°C, приблизительно от -10 до -50°C или приблизительно от -18 до -40°C. Хотя стадия превращения в суспензию описана применительно к использованию CO<sub>2</sub> как основы суспензии, должно быть понятно, что могут быть использованы другие разжижающие среды.

Суспензия 255 может быть направлена из смесителя 250 через насос 270 в устройство 300 сжигания. В частных вариантах выполнения устройство 300 сжигания может представлять собой высокоэффективную камеру сгорания, выполненную с возможностью обеспечения в основном полного сжигания топлива при относительно высокой температуре горения. Высокотемпературное горение может быть особенно эффективным для обеспечения в основном полного сжигания всех горючих компонентов топлива и таким образом достижения максимального КПД. В различных вариантах выполнения высокотемпературное горение может означать горение при температурах по меньшей мере приблизительно 1000, по меньшей мере приблизительно 1200, по меньшей мере приблизительно 1500, по меньшей мере приблизительно 2000 или по меньшей мере приблизительно 3000°C. В других вариантах выполнения высокотемпературное горение может означать горение при температурах приблизительно от 1000 до 5000°C или приблизительно от 1200 до 3000°C.

В некоторых вариантах выполнения устройство 300 сжигания может представлять собой камеру сгорания с транспирационным охлаждением. Один из примеров камеры сгорания с транспирационным охлаждением, которая может быть использована в настоящем изобретении, описан в патентных публикациях US 2010/0300063 и US 2011/0083435, содержание которых целиком включено в данную заявку путем ссылки. В некоторых вариантах выполнения камера сгорания с транспирационным охлаждением, эффективная согласно настоящему изобретению, может содержать одну или несколько теплообменных зон, одну или несколько охлаждающих текучих сред и одну или несколько транспирационных текучих сред.

Использование камеры сгорания с транспирационным охлаждением согласно настоящему изобретению имеет особые преимущества над известным в предшествующем уровне техники сжиганием топлива для выработки энергии. Например, использование транспирационного охлаждения может эффективно предотвращать коррозию, загрязнение и эрозию в камере сгорания. Кроме того, это делает возможным работу в значительно более высоком температурном диапазоне, что позволяет полностью или по меньшей мере в основном полностью сжигать используемое топливо. Эти и другие преимущества также описаны в данном изобретении.

В одном из частных вариантов выполнения камера сгорания с транспирационным охлаждением согласно настоящему изобретению может включать камеру сгорания, по меньшей мере, частично сформированную транспирационным элементом, который, по меньшей мере частично, охвачен элементом защитной оболочки высокого давления. Камера сгорания может иметь входную часть и противоположную ей выходную часть. Входная часть камеры сгорания может быть выполнена с возможностью приема углеродосодержащего топлива для его сжигания в камере сгорания при некоторой температуре горения с образованием продуктов горения. Камера сгорания может быть выполнена с возможностью направления продуктов горения к выходной части. Транспирационный элемент может быть выполнен с возможностью направления сквозь него транспирационной субстанции в камеру сгорания для предотвращения

непосредственного взаимодействия между продуктами горения и транспирационным элементом. Кроме того, транспирационный элемент может быть введен в камеру сгорания для обеспечения требуемой выходной температуры продуктов горения. В частных вариантах выполнения транспирационная субстанция может, по меньшей мере частично, содержать циркулирующую текучую среду. Стенки камеры сгорания могут быть облицованы слоем пористого материала, сквозь который направляется и проходит транспирационная субстанция, такая как  $\text{CO}_2$  и(или)  $\text{H}_2\text{O}$ .

Поток транспирационной субстанции через пористый транспирационный элемент и опционно через дополнительные средства доставки может быть таким, чтобы обеспечивать требуемую температуру выходного потока текучей среды на выходе из устройства 300 сжигания. В некоторых вариантах выполнения, что далее описано в данном изобретении, такие температуры могут лежать в диапазоне приблизительно от 500 до 2000°C. Этот поток может также служить для охлаждения транспирационного элемента до температуры ниже максимально допустимой рабочей температуры материала, из которого выполнен транспирационный элемент. Транспирационная субстанция может также служить для предотвращения попадания на стенки жидкого или твердого шлака или других загрязняющих примесей, имеющих в топливе, которые могут привести к коррозии, загрязнению или другим повреждениям стенок. В таких случаях может быть желательным использовать для транспирационного элемента материал с надлежащей (низкой) теплопроводностью, чтобы присущее лучистое тепло могло отводиться в радиальном направлении наружу через пористый транспирационный элемент и затем передаваться за счет конвективной теплопередачи от поверхностей пористого слоя текучей среде, проходящей по радиусу вовнутрь к транспирационному слою. Такая конфигурация может обеспечивать возможность нагрева следующей части разбавляющего потока, направляемого сквозь транспирационный элемент, до температуры, лежащей в диапазоне приблизительно от 500 до 1000°C, и одновременно поддерживать температуру пористого транспирационного элемента в диапазоне, допустимом для использованного в нем материала. Пригодные материалы для пористого транспирационного элемента могут включать, например, пористые керамики, сетки из тугоплавких металлических нитей, цилиндрические секции с просверленными отверстиями, и(или) слой спеченного металла, или спеченные металлические порошки. Второе предназначение транспирационного элемента может состоять в том, чтобы обеспечивать в основном постоянный, направленный по радиусу внутрь поток транспирационной текучей среды, в том числе в продольном направлении камеры сгорания, для достижения хорошего перемешивания между потоком транспирационной текучей среды и продуктами горения при продвижении равномерного осевого потока вдоль длины камеры сгорания. Третье предназначение транспирационного элемента может состоять в достижении скорости разбавляющей текучей среды радиально внутрь такой, чтобы создавать буфер или другим образом препятствовать ударам твердых и(или) жидких шлаковых включений или других загрязняющих примесей, содержащихся в продуктах горения, о поверхность транспирационного слоя, приводящим к его забиванию, эрозии, коррозии или другим повреждениям. Этот фактор может иметь особое значение, например, при сжигании такого топлива как уголь, после которого остается инертный негорючий остаток. Внутренняя стенка сосуда высокого давления камеры сгорания, охватывающая транспирационный элемент, также может быть изолирована для заключения высокотемпературного потока транспирационной текучей среды внутри камеры сгорания.

В некоторых вариантах выполнения может быть обеспечено смесительное устройство (не показано) для смешивания материалов, вводимых в устройство 300 сжигания перед этим введением. В частности, в опционном смесительном устройстве может быть составлена любая комбинация из двух или всех трех компонентов из группы, включающей топливо,  $\text{O}_2$  и циркулирующую текучую среду (например циркулирующую текучую среду на основе  $\text{CO}_2$ ), перед введением в устройство 300 сжигания.

Топливо 15, вводимое в устройство 300 сжигания (в виде потока 255 суспензии) вместе с  $\text{O}_2$  120 и рециркулированной циркулирующей текучей средой 503, сжигается с получением потока 320 продуктов горения. В частных вариантах выполнения устройство 300 сжигания представляет собой камеру сгорания с транспирационным охлаждением, такую, как описана выше. Температура горения может изменяться в зависимости от конкретных параметров процесса, например вида используемого топлива, молярного соотношения между циркулирующей текучей средой и углеродом в топливе, вводимом в камеру сгорания, и(или) молярного соотношения  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , вводимых в камеру сгорания. В частных вариантах выполнения температура горения - это температура, приведенная выше при описании камеры сгорания с транспирационным охлаждением. В особо предпочтительных вариантах выполнения температуры, превышающие приблизительно 1000°C, как описано выше, могут быть особенно выигрышными.

Может быть также полезным регулирование температуры так, чтобы поток продуктов горения, выходящий из камеры сгорания, принимал нужную температуру. Например, может быть полезным, чтобы поток продуктов горения, выходящий из камеры сгорания, имел температуру по меньшей мере приблизительно 700°C, по меньшей мере приблизительно 900°C, по меньшей мере приблизительно 1200°C или по меньшей мере приблизительно 1600°C. В некоторых вариантах выполнения поток продуктов горения может иметь температуру приблизительно от 700 до 1600°C или приблизительно от 1000 до 1500°C.

В частности, давление в потоке 320 продуктов горения может быть сравнимо с давлением циркулирующей текучей среды, вводимой в устройство 300 сжигания. В частных вариантах выполнения давле-

ние в потоке 320 продуктов горения может составлять приблизительно 90% от давления циркулирующей текучей среды, вводимой в устройство 300 сжигания.

Химический состав потока 320 продуктов горения, выходящего из устройства 300 сжигания, может меняться в зависимости от вида используемого топлива. Что важно, поток продуктов горения будет содержать основной компонент циркулирующей текучей среды (например  $\text{CO}_2$ ), которая будет рециклирована и повторно введена в устройство 300 сжигания. В других вариантах выполнения поток 320 продуктов горения может содержать один или несколько компонентов из группы, включающей водяные пары,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Hg}$ , избыточный  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ , негорючие и(или) другие вещества в виде твердых частиц и, возможно, другие загрязняющие примеси, которые могут присутствовать в сжигаемом топливе. Эти вещества, присутствующие в потоке продуктов горения, могут сохраняться в потоке циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  до тех пор, пока они не будут удалены в процессе, таком как описанный в данном изобретении.

Преимущество настоящему изобретению заключается в том, что поток 320 продуктов горения может быть направлен в турбину 400 без необходимости в первоначальной фильтрации от твердых частиц, содержащихся в нем. В турбине 400 поток 320 продуктов горения расширяется, вырабатывая энергию (например электрическую энергию посредством генератора 400a). Турбина 400 может иметь входную часть, служащую для приема потока 320 продуктов горения, и выходную часть, служащую для выпуска выходного потока 410 турбины. Хотя на фиг. 1 показана одиночная турбина, должно быть понятно, что может использоваться более одной турбины, несколько турбин, соединенных последовательно или, как вариант, разделенных одной или несколькими дополнительными компонентами, такими как узел сжигания, узел сжатия, узел разделения и т.п.

В частности, турбина 400 может представлять собой турбину, имеющую описанные в данном изобретении конструкцию лопатки и(или) общую конструкцию. Кроме того, в турбине может применяться транспирационное охлаждение или другая технология охлаждения, как описано в данном изобретении. В частности, в конструкции турбины могут предусматриваться такие низкие скорости лопаток и скорости столкновения с частицами шлака, которые позволяют турбине выдерживать удары без значительной эрозии. Транспирационное охлаждение турбины может также защищать ее от эрозии, вызываемой твердыми частицами, путем создания непрерывного текучего защитного слоя транспирационной текучей среды между поверхностью лопатки и твердыми частицами, проходящими через турбину.

Как показано на фиг. 1, приводимые в качестве примера система и цикл включают фильтр 5, введенный ниже турбины 400 по потоку. Выходной поток 410 турбины может быть пропущен через фильтр 5 с целью удаления из него твердых частиц материала. Установка фильтра 5 ниже по потоку, чем турбина 400, а не выше ее по потоку, является отличительным свойством настоящего изобретения, так как поток 320 продуктов горения может расширяться в турбине при более высоких температуре и давлении, если он выходит непосредственно из устройства 300 сжигания, и, следовательно, может обеспечивать максимально возможную выработку энергии. Находящийся под более низким давлением и более холодный выходной поток 410 турбины может быть затем очищен фильтром 5 для удаления из него твердых частиц материала в виде потока 7 твердых частиц. Таким образом, отфильтрованный выходной поток 420 турбины обеспечивается в основном свободным от твердых частиц материала для его дальнейшего использования в цикле сжигания.

В частных вариантах выполнения фильтр 5 предпочтительно может иметь конструкцию, обеспечивающую эффективное удаление в основном всех твердых частиц материала, присутствующих в потоке 320 продуктов горения. В некоторых вариантах выполнения фильтр 5 может включать циклонный фильтр и(или) свечной фильтр и в некоторых вариантах выполнения фильтрация может происходить при температурах, лежащих в диапазоне приблизительно от 300 до  $775^\circ\text{C}$ . В частных вариантах выполнения удаление в основном всех твердых частиц может включать удаление по меньшей мере 95, по меньшей мере 97, по меньшей мере 98, по меньшей мере 99, по меньшей мере 99,5 или по меньшей мере 99,8% объема твердых частиц, присутствующих в потоке продуктов горения. Эта эффективность удаления фильтром твердых частиц может быть связана с размером частиц. Например, указанные процентные доли удаленных частиц могут зависеть от способности фильтра задерживать частицы с диаметром, составляющим по меньшей мере 0,1, по меньшей мере 1, по меньшей мере 5, по меньшей мере 10, по меньшей мере 25, по меньшей мере 50, по меньшей мере 100 или по меньшей мере 500 мкм. В одном из вариантов выполнения частицы, получающиеся при горении, могут иметь размеры, лежащие в диапазоне приблизительно от 0,1 до 100 мкм, и фильтр может быть выполнен с возможностью удаления в основном всех частиц, имеющих диаметр, больше приблизительно 1, больше приблизительно 5, больше приблизительно 10, больше приблизительно 15, больше приблизительно 20 мкм, и снижения общего уровня содержания твердых частиц до значения, менее приблизительно 10, менее приблизительно 5, менее приблизительно 1 или менее приблизительно  $0,5 \text{ мг/м}^3$ .

В частных вариантах выполнения (то есть в тех, в которых в качестве циркулирующей текучей среды используется  $\text{CO}_2$ ) отфильтрованный выходной поток 420 турбины может пропускаться через теплообменный блок 500 (который может представлять собой последовательно установленные теплообменники), формирующий необработанный рециклированный поток 501. Этот необработанный рециклирован-

ный поток 501 может быть пропущен через теплообменник 520 с холодной водой, формирующий поток 521, который подается в сепаратор 540 для удаления из него вторичных компонентов (например,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $SO_4$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$  и  $Hg$ ) в виде потока 542. В частных вариантах выполнения сепаратор 540 может включать реактор, содержащий контактный фильтр, время нахождения в котором достаточно для того, чтобы загрязняющие примеси могли прореагировать с водой, образуя легко удаляемые продукты (например кислоты). Очищенный поток 541 циркулирующей текучей среды из сепаратора 540 может быть пропущен через компрессор 550, формирующий поток 551, который также может быть охлажден в теплообменнике 560 с холодной водой с получением циркулирующей текучей среды 561 на основе сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$ . В некоторых вариантах выполнения циркулирующая текучая среда 541 на основе очищенного  $CO_2$  может находиться под давлением по меньшей мере приблизительно 7,5 МПа или по меньшей мере приблизительно 8 МПа. Часть потока 561 может быть отведена в виде потока 562 для использования в качестве псевдоожижающей среды в смесителе 250, в котором формируется поток 255 суспензии. Поток 561 циркулирующей текучей среды на основе сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$  сжимается в компрессоре 570 с образованием потока 571 циркулирующей текучей среды на основе сжатого, сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$ . Часть  $CO_2$  из потока 571 может быть отведена в виде потока 572 в трубопровод  $CO_2$  или другое средство удаления. Оставшаяся часть  $CO_2$  может быть подвергнута дальнейшей обработке как поток 573 циркулирующей текучей среды на основе сжатого, сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$ , который для его нагрева может быть пропущен обратно через теплообменник 500 (или последовательность теплообменников). В частных вариантах выполнения циркулирующая текучая среда на основе  $CO_2$  может быть обеспечена с плотностью, составляющей по меньшей мере приблизительно 200, по меньшей мере приблизительно 300, по меньшей мере приблизительно 500, по меньшей мере приблизительно 750 или по меньшей мере приблизительно 1000  $kg/m^3$  после выхода из теплообменника 560 с холодной водой (и до пропускания для нагрева через теплообменный блок 500). В других вариантах выполнения плотность может составлять приблизительно от 150 до 1100  $kg/m^3$ . Пропускание потока 551 через теплообменник 560 с холодной водой может охладить циркулирующую текучую среду на основе  $CO_2$  до температуры менее приблизительно 60, менее приблизительно 50 или менее приблизительно 30°C. Циркулирующая текучая среда в потоке 561, поступающем во второй компрессор 570, может быть обеспечена под давлением по меньшей мере приблизительно 12 МПа. В некоторых вариантах выполнения поток может быть сжат до давления, составляющего приблизительно от 15 до 50 МПа. Может быть использован компрессор любого типа, способный работать при указанных температурах и обеспечивать заданные давления, например многоступенчатый насос.

Циркулирующая текучая среда на основе нагретого, сжатого, сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$  может выходить из теплообменника 500 в виде первого потока 503, подаваемого как используемая повторно (рециклированная) циркулирующая текучая среда. В некоторых вариантах выполнения циркулирующая текучая среда на основе нагретого, сжатого, сверхкритического, высокоплотного  $CO_2$  может выходить из теплообменника 500 как второй рециклированный поток 504 циркулирующей текучей среды, используемый как транспирационная текучая среда для турбинных лопаток. Предпочтительно второй рециклированный поток 504 циркулирующей текучей среды может быть регулируемым так, чтобы общую массу или объем циркулирующей текучей среды в потоке можно было увеличивать или уменьшать при необходимости повысить или снизить защиту, создаваемую транспирационной текучей средой. В частности, предлагаемая в настоящем изобретении система может содержать средство регулирования потока, например так, чтобы второй рециклированный поток 504 циркулирующей текучей среды можно было полностью перекрывать при желании.

Заметим, что в некоторых вариантах выполнения повторно используемая циркулирующая текучая среда (например  $CO_2$ ), подаваемая в турбину 400, до ввода в турбину может направляться в обход теплообменника 500. При этом повторно используемый  $CO_2$  может быть сжат компрессором 570, и затем часть потока 571 циркулирующей текучей среды может направляться в обход теплообменника 500 в турбину 400. Тем самым  $CO_2$  (или другая повторно используемая циркулирующая текучая среда) может вводиться в турбину 400 без нагревания в теплообменнике 500. Соответственно  $CO_2$  (или другая повторно используемая циркулирующая текучая среда) может вводиться в турбину при температуре, которая меньше температуры текучей среды, нагретой в теплообменнике. Поэтому  $CO_2$  (или другая повторно используемая циркулирующая текучая среда) может вводиться в турбину при температуре менее приблизительно 300, менее приблизительно 200, менее приблизительно 100, менее приблизительно 55 или менее приблизительно 25°C, и, таким образом,  $CO_2$  (или другая повторно используемая циркулирующая текучая среда) может использоваться для охлаждения турбины 400. Для компенсации добавления относительно более холодной циркулирующей текучей среды в турбину 400  $O_2$  для его нагрева может пропускаться через теплообменник 500, и затем  $O_2$  может смешиваться с рециклированной циркулирующей текучей средой 503, направляемой в камеру 300 сгорания, для компенсации потери эффективности, которая в противном случае может произойти. В некоторых вариантах выполнения циркулирующая текучая среда, выходящая из теплообменника (или из выпускного теплообменника, если используются два или несколько теплообменников), может иметь температуру менее приблизительно 200, менее приблизительно 100, менее приблизительно 75 или менее приблизительно 40°C.

При этом в некоторых вариантах выполнения может быть полезным, чтобы теплообменник, в который поступает выходной поток турбины, был выполнен из высококачественных материалов, рассчитанных на противостояние экстремальным условиям. Например, теплообменник может содержать сплав INCONEL® или другой аналогичный материал. Предпочтительно, чтобы теплообменник содержал материал, способный выдерживать непрерывную работу при температуре по меньшей мере приблизительно 700, по меньшей мере приблизительно 900 или по меньшей мере приблизительно 1200°C. Может быть также полезным, чтобы один или несколько теплообменников содержали материал, обеспечивающий высокую химическую стойкость по отношению к вторичным веществам, которые могут присутствовать в потоке продуктов горения. Сплавы INCONEL®, поставляемые Special Metals Corporation, и некоторые их модификации могут содержать аустенитные сплавы на хромоникелевой основе. Удовлетворяющие требованиям теплообменники могут содержать эти сплавы, поставляемые под торговой маркой HEAT-RIC® (фирмой Meggitt USA, Houston, TX).

Как было отмечено ранее, кроме воды циркулирующая текучая среда на основе CO<sub>2</sub> может содержать другие вторичные компоненты, такие как загрязняющие примеси, получающиеся из топлива в результате горения и в результате окисления. Эти вторичные компоненты циркулирующей текучей среды на основе CO<sub>2</sub> (часто рассматриваемые как загрязняющие примеси или инородные включения) могут быть все удалены из охлажденной циркулирующей текучей среды на основе CO<sub>2</sub> путем использования соответствующих способов (например способов, раскрытых в патентной публикации US 2008/0226515 и в патентных публикациях EP 1952874 и EP 1953486, содержание которых в полном объеме включено в данную заявку путем ссылки). Например, SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub> могут быть на 100% превращены в серную кислоту, в то время как NO и NO<sub>2</sub> могут быть превращены в азотную кислоту. Избыточный O<sub>2</sub>, присутствующий в циркулирующей текучей среде на основе CO<sub>2</sub>, может быть отделен в виде обогащенного потока для опционального повторного использования в камере сгорания. Присутствующие инертные газы (например N<sub>2</sub> и Ar) могут быть выпущены под низким давлением в атмосферу.

Как описано выше, цикл выработки энергии, включающий турбину, выполненную согласно настоящему изобретению, может действовать с высоким КПД, в частности, потому, что поток продуктов горения (например, образующихся при сжигании твердого топлива, такого как уголь) может вводиться непосредственно в турбину без необходимости в отделении сначала твердых частиц материала, присутствующих в потоке продуктов горения. В частности, в предлагаемых в изобретении конфигурациях турбины устраняется или в значительной мере снижается эрозия, возникающая из-за ударов частиц негорючих продуктов. Несмотря на то, что изобретение обеспечивает такую значительную защиту материалов турбины, все же может происходить повреждение турбины из-за взаимодействия ее компонентов с твердыми компонентами, присутствующими в потоке продуктов горения.

Например, жидкий шлак, налипнувший и затвердевший (загустевший) на турбинных лопатках, может привести к разеданию шлаком, потере эффективности и(или) потере баланса ротора. Соответственно, в некоторых вариантах выполнения настоящее изобретение предусматривает введение специальных компонентов в цикл сжигания для смягчения и(или), по меньшей мере, частичного устранения нарастания или химического осаждения на компонентах турбины, в частности на турбинных лопатках. Хотя нарастание шлака приведено в качестве примера, должно быть понятно, что можно ожидать, что очистка, обеспечиваемая в вариантах выполнения настоящего изобретения, будет эффективной при, по меньшей мере, частичном или полном удалении любых отложений на турбинных компонентах, образующихся из-за воздействия материалов, содержащихся в потоке продуктов горения, в особенности материалов в виде твердых частиц. Таким образом различные виды шлака, вещества, вызывающие появление шлака, и углерод могут быть удалены путем предлагаемой в изобретении очистки.

Нарастание химического осадка на турбинных компонентах, например на турбинных лопатках, может быть предотвращено при применении технологий транспирационного охлаждения. Например, как показано на фиг. 1, горячее рециклированное рабочее тело (например, CO<sub>2</sub>) может быть отведено с горячего края теплообменника 500 в виде потока 504 и направлено в турбину 400. Например, горячее рециклированное рабочее тело может быть направлено к ротору турбины и затем сквозь турбинные лопатки, обеспечивая их транспирационную защиту. В таких вариантах выполнения в турбинных лопатках при необходимости могут быть выполнены отверстия так, чтобы горячее рециклированное рабочее тело выходило из лопаток в основном по всей их поверхности или, по меньшей мере, из передней поверхности лопаток, то есть непосредственно в поток продуктов горения, поступающий в турбину. В частных вариантах выполнения наибольший поток транспирационной текучей среды из лопаток должен наблюдаться у входных кромок лопаток.

Транспирационная текучая среда может обеспечиваться при различных температурах. В некоторых вариантах выполнения транспирационная текучая среда в турбине может находиться при температуре, отличающейся от температуры потока продуктов горения, поступающего в турбину, приблизительно на 10, приблизительно на 8, приблизительно на 5 или приблизительно на 2%. В таких вариантах выполнения температура транспирационной текучей среды в турбине может считаться в основном соответствующей температуре потока продуктов горения, поступающего в турбину. В других вариантах выполне-

ния транспирационная текучая среда в турбине, используемая для транспирационной защиты, может иметь температуру, которая меньше температуры потока продуктов горения, поступающего в турбину, на величину, составляющую приблизительно от 15 до 90%, приблизительно от 15 до 60%, приблизительно от 15 до 50% или приблизительно от 20 до 40%. В таких вариантах выполнения температура транспирационной текучей среды в турбине может считаться значительно меньшей температуры потока продуктов горения, поступающего в турбину.

В некоторых вариантах выполнения использование транспирационной текучей среды в турбинных лопатках может выполнять несколько функций. Например, транспирационная текучая среда может быть эффективным средством защиты турбинных лопаток, так как она может, по существу, предотвращать контакт материалов в виде твердых частиц, содержащихся в потоке продуктов горения, с поверхностью лопаток. Защитный барьер, сформированный транспирационной текучей средой, может отражать или иным образом перенаправлять твердые частицы от турбинных лопаток. Горячее рециклированное рабочее тело может также служить для нагрева лопаток, в частности поверхностей лопаток на выходной стороне турбины. Этот дополнительный нагрев может предотвращать поверхности лопаток на выходной стороне турбины и (или) на входной стороне турбины от охлаждения до температуры, при которой жидкий шлак (или другие материалы, которые находятся в жидком состоянии при температуре потока продуктов горения и имеют точку затвердевания (или загустения), которая ниже температуры потока продуктов горения, но выше окружающей температуры) загустеет (то есть температуры затвердевания материала). Это предотвращает затвердевание (загустение) жидких частиц, которые на самом деле достигли поверхности турбинной лопатки, и, таким образом, предотвращает их осаждение на поверхностях лопаток.

В некоторых вариантах выполнения транспирационная защита может устранять затвердевание (или загустение) частиц. При этом в некоторых вариантах выполнения шлак может оставаться расплавленным выше приблизительно 870-980°C. В других вариантах выполнения затвердевание частиц может быть снижено в аналогичных циклах и системах, в которых не используется транспирационная защита. Так как затвердевание крупных частиц уменьшается, но не устраняется, может потребоваться периодическая очистка турбинных компонентов. В частных вариантах выполнения очистка турбинных компонентов, например турбинных лопаток, может быть сделана эффективной за счет введения очистных компонентов в цикл или систему сжигания.

Представленный на фиг. 2 цикл является иллюстрацией системы, в которой для очистки турбинных лопаток через турбину могут направляться очищающие турбинные лопатки материалы. Преимущество заключается в том, что очищающие материалы могут направляться через турбину вместе с потоком продуктов горения. Поэтому очистка может эффективно проводиться без прерывания цикла сжигания для выработки энергии. В некоторых вариантах выполнения может быть желательным изменение одного или нескольких параметров цикла, рассмотренных в данном изобретении, с целью облегчения процесса очистки (например изменение температуры потока продуктов горения, увеличение отношения рециклированного потока к потоку топлива и т.п.). В некоторых вариантах выполнения, в которых турбинные лопатки имеют транспирационную защиту, может быть желательным прекратить поток транспирационной текучей среды для облегчения контакта очищающего материала с турбинными лопатками. Однако горение и выработка энергии могут продолжаться одновременно с процессом очистки.

Согласно фиг. 2 цикл сжигания может продолжаться в основном так же, как описано в отношении фиг. 1. Однако в представленных вариантах выполнения из теплообменника 500 может поступать третий рециклированный поток 506 циркулирующей текучей среды и проходить через узел 600 смешивания очищающего материала, в котором очищающий материал смешивается с третьим рециркуляционным потоком 506 циркулирующей текучей среды, образуя поток 610 очищающего материала. Узел 600 смешивания очищающего материала может включать любую конструкцию, блок или устройство, пригодные для смешивания третьего рециркуляционного потока 506 циркулирующей текучей среды с очищающим материалом, и в которые очищающий материал подается непрерывным потоком или периодически. Предпочтительно, чтобы узел смешивания очищающего материала был выполнен так, чтобы очищающий материал соединялся с рециркуляционным потоком 506 и перетекал вместе с ним. Как уже описано выше в отношении второго рециркуляционного потока 504 циркулирующей текучей среды, третий рециркуляционный поток 506 циркулирующей текучей среды может регулироваться так, чтобы скорость потока могла становиться равной нулю или принимать любое значение, необходимое для эффективной транспортировки очищающего материала в турбину.

Очищающим материалом может быть любой материал, эффективно контактирующий с поверхностью турбинных лопаток и физическим или химическим путем удаляющий с нее твердые отложения. Предпочтительно очищающий материал эффективно удаляет отложения и при этом минимально вызывает эрозию самих поверхностей турбинных лопаток. Твердые очищающие материалы могут содержать частицы углерода, частицы алюминия или другие твердые частицы, не расплавляющиеся при температурах потока. Разрушение шлака, но не лопаток, может происходить при низких скоростях ударов, так как шлак может представлять собой менее прочную фракцию, чем турбинная лопатка. Жидкие очищающие материалы могут включать калийные соединения, например оксид калия, карбонат или гидроксид. Калийные соединения могут действовать как добавка, снижающая точку разжижения шлака так, чтобы он

мог стекать с лопатки. Газообразные очищающие материалы могут включать кислород, который способен окислять отложения, такие как углерод. Твердые или жидкие очищающие материалы, смешанные с третьим рециклированным потоком 506 циркулирующей текучей среды, могут составлять менее приблизительно 0,5, менее приблизительно 0,1 или менее приблизительно 0,01% от общего массового расхода в потоке 610 очищающего материала и составлять приблизительно от 0,001 до 0,1%, приблизительно от 0,01 до 1% или приблизительно от 0,0001 до 0,01% от общего массового расхода в потоке очищающего материала. Газообразные очищающие материалы, смешанные с третьим рециклированным потоком 506 циркулирующей текучей среды в узле 600 смешивания очищающего материала, могут составлять менее приблизительно 5, менее приблизительно 2 или менее приблизительно 1% от общего массового расхода в потоке 610 очищающего материала и составлять приблизительно от 0,1 до 2%, приблизительно от 0,01 до 1% или приблизительно от 0,01 до 5% от общего массового расхода в потоке очищающего материала. В одном из вариантов выполнения цикл очистки может быть задействован всякий раз, когда выходная мощность с генератора 400а снижается на величину, составляющую приблизительно от 2 до 5%, приблизительно от 5 до 10% или приблизительно от 1 до 2%. Например, операция очистки может проводиться с частотой приблизительно от одного раза в неделю до одного раза в три года. Цикл очистки может длиться приблизительно от 5 мин до 1 ч в некоторых вариантах выполнения.

Поток 610 очищающего материала может поступать непосредственно в турбину 400. В таких вариантах выполнения поток очищающего материала может смешиваться с потоком 320 продуктов горения на общем входе в турбину 400 или поток 610 очищающего материала и поток 320 продуктов горения могут иметь отдельные входы в турбину так, чтобы потоки смешивались в некоторой точке внутри турбины 400. В представленном варианте выполнения поток 610 очищающего материала сначала смешивается с потоком 320 продуктов горения в смесительном переключателе 650 потока. Таким образом, в цикле очистки смешанный поток 326 продуктов горения и очищающего материала выходит из смесительного переключателя 650 и поступает в турбину 400.

В некоторых вариантах выполнения может использоваться непрерывная очистка, при которой может поддерживаться некоторая минимальная величина третьего рециклированного потока 506 так, чтобы в турбину постоянно вводилось некоторое количество очищающего материала. Величина расхода в третьем рециклированном потоке 506 циркулирующей текучей среды может регулироваться в большую или меньшую сторону, периодически увеличивая или снижая очистительные возможности цикла. В других вариантах выполнения третий рециклированный поток 506 циркулирующей текучей среды может быть перекрыт так, чтобы очищающий материал не поступал из узла 600 смешивания очищающего материала в смесительный переключатель 650 потока. В этом режиме работы поток 320 продуктов горения может быть направлен в обход смесительного переключателя 650 потока и поступать непосредственно в турбину, как показано на фиг. 1. Альтернативно поток 320 продуктов горения может продолжить похождение через смесительный переключатель 650 потока, но при отсутствии поступления потока 610 очищающего материала поток, выходящий из смесительного переключателя 650, будет в основном тем же потоком 320 продуктов горения, не смешанным с потоком 326 очищающего материала.

В вариантах выполнения, в которых задействован цикл очистки, отложения или осадок, удаленные с турбинных лопаток, могут выводиться из цикла через фильтр 5 так же, как описано в связи с фиг. 1. Аналогично при использовании твердых очищающих материалов они также могут быть выведены из цикла через фильтр 5. В некоторых вариантах выполнения фильтр 5 может быть многоблочным фильтром, в котором первая фильтровальная среда или блок используется при обычном течении процесса сжигания и вторая фильтровальная среда или блок может использоваться при проведении цикла очистки для сбора очищающего материала и удаленных с лопаток отложений без необходимости в загрязнении фильтра, используемого в обычном цикле сжигания. Предлагаемая в изобретении система может включать соответствующие устройства, способствующие такому переключению между фильтрами.

#### **Примеры осуществления изобретения**

Далее настоящее изобретение будет описано со ссылкой на нижеследующие примеры, не служащие для ограничения объема изобретения, а скорее демонстрирующие иллюстративные варианты осуществления изобретения.

На фиг. 3 представлен иллюстративный вариант выполнения камеры 1000 сгорания, которая может быть использована в соответствии с системами и способами, раскрытыми в изобретении. Топочная камера 1000 может формировать камеру 1002 сгорания, в которую через топливный вход 1004 направляется топливо и через кислородный вход 1006 направляется кислород. Соответственно топливо может сжигаться с образованием потока 1008 продуктов горения. Топочная камера 1000 может содержать кожух, включающий наружный кожух 1010 и внутренний кожух 1012. Внутренний кожух 1012 может содержать проницаемый материал, такой как пористый спеченный материал (например пористый спеченный металл), выполненный с возможностью принимать транспирационную текучую среду 1014 и обеспечивать транспирацию сквозь него текучей среды с формированием транспирационного слоя 1016, способного снижать поток тепла, направленный на корпус. В некоторых вариантах выполнения транспирационная текучая среда может поступать через вход 1026, хотя в других вариантах выполнения транспирационная текучая среда может поступать от турбины, соединенной с камерой сгорания, как рассмотрено далее.

Соответственно топочная камера 1000 может быть выполнена с возможностью выдерживать тепло, образующееся в камере 1002 сгорания, без применения дорогих жаропрочных материалов, таких как жаропрочные сплавы, и(или) топочная камера может работать при повышенных температурах горения.

Как описано выше, поток продуктов горения, образующийся в топочной камере, может использоваться для вращения турбины. При этом на фиг. 4 приведен иллюстративный вариант выполнения турбины 2000. В одном из вариантов выполнения турбина 2000 может включать входной канал 2002, выполненный с возможностью соединения с выходом топочной камеры (например топочной камеры 1000) и направления потока продуктов горения (например потока 1008 продуктов горения) во входную часть кожуха 2004 турбины. Турбина 2000 может содержать ротор 2006, на котором закреплена группа лопаток 2008. Ротор 2006 может содержать узел 2010 формирования кольцевого потока (турбинный дивертер), приспособленный для направления потока продуктов горения вокруг ротора. Соответственно поток 1008 продуктов горения может расширяться при прохождении через турбину 2000, тем самым приводя к тому, что лопатки 2008 вращают ротор 2006 и силовой вал 2011 (который может быть выполнен воедино с ротором или соединен с ним) до тех пор, пока не превратится в выходной поток турбины, выпускаемый через один или несколько выходных каналов 2014. При этом турбина 2000 может приводить в действие генератор или другое устройство.

Что также показано на фиг. 4, входной канал 2002 может включать внутренний кожух 2016 и наружный кожух 2018. Кроме того, кожух 2004 турбины 2000 может включать внутренний кожух 2020 и наружный кожух 2022. Транспирационная текучая среда 2024 может направляться из входного канала 2026 между внутренними кожухами 2016, 2020 и наружными кожухами 2018, 2022 входного канала 2002 и турбины 2000. Внутренние кожухи 2016, 2020 могут содержать проницаемый материал, такой как пористый спеченный материал (например пористый спеченный металл), выполненный с возможностью приема транспирационной текучей среды 2024 и транспирации ее сквозь этот материал. Тем самым может быть сформирован транспирационный слой 2028 между потоком 1008 продуктов горения и внутренней поверхностью входного канала 2002 и может быть сформирован транспирационный слой 2030 между лопатками 2008 и внутренней поверхностью внутреннего кожуха 2020, при этом внутренние кожухи могут охлаждаться или иным образом защищаться транспирационной текучей средой 2024. В некоторых вариантах выполнения транспирационная текучая среда, вводимая в турбину, может подаваться также в топочную камеру для транспирационного охлаждения. При этом входной канал может, например, сопрягаться с топочной камерой так, чтобы в некоторых вариантах выполнения в нее подавалась транспирационная текучая среда. Однако транспирационная текучая среда, подаваемая в топочную камеру, может дополнительно или альтернативно вводиться через отдельный канал 1026.

Кроме того, транспирационная текучая среда 2024 может также вводиться в турбину 2000 через второй входной канал 2032, который в некоторых вариантах выполнения может быть сформирован в силовом валу 2011. Соответственно транспирационная текучая среда 2024 может проходить через силовой вал 2011 в ротор 2006. Ротор 2006 и(или) лопатки 2008 могут содержать проницаемый материал, такой как пористый спеченный материал (например, пористый спеченный металл), выполненный с возможностью приема транспирационной текучей среды 2024 и транспирации текучей среды через этот материал к их наружным поверхностям. Соответственно ротор 2006 и(или) лопатки 2008 могут транспирационной текучей средой охлаждаться или другим образом защищаться от потока 1008 продуктов горения и содержащихся в нем твердых частиц.

На фиг. 5 и 6 представлен альтернативный вариант выполнения турбины 2000'. Как показано, несколько топочных камер 1000' могут быть выполнены с возможностью приведения в действие турбины 2000'. В частности, как показано на фиг. 6, топочные камеры 2000' могут быть расположены на радиусах относительно главной оси, сформированной ротором 2006'. Как показано на фиг. 5, турбина 2000' может быть в основном аналогична варианту выполнения турбины 2000 с фиг. 4 за исключением того, что топочные камеры 1000' могут направлять потоки 1008' вокруг ротора 2006'. Соответственно для направления потоков 1008' продуктов горения вокруг ротора 2006' узел формирования кольцевого потока может не понадобиться. Каждая из топочных камер 1000' может быть в основном аналогичной топочной камере 1000, описанной выше, за исключением размещения топочных камер вокруг ротора 2006'.

На фиг. 7 дано поперечное сечение 2008А для варианта выполнения турбинной лопатки, которая может быть использована в раскрытых в данном изобретении турбинах. Турбинная лопатка 2008А может содержать наружный слой 3002 и сердцевину 3004. Сердцевина может быть выполнена из относительно прочного металла или другого материала, из которого сформирован элемент жесткости. Понятие "прочный металл", как оно употребляется в данном описании, относится к металлу, прочностью более приблизительно 10000 psi (48824 кг/м<sup>2</sup>), более приблизительно 20000 psi (97649 кг/м<sup>2</sup>) или более приблизительно 30000 psi (146472 кг/м<sup>2</sup>) при соответствующих повышенных температурах и химически стойкому при соответствующих температурах. Примеры таких металлов включают различные нержавеющие стали, высокопрочные никелевые сплавы с высоким содержанием никеля, например Inconel, и т.п. Итак, настоящее изобретение дает возможность использования более дешевых сплавов, таких как нержавеющая сталь (например нержавеющая сталь марки 316) или других сплавов с более низким содержанием никеля, которые можно применять вместо обычных жаропрочных сплавов с относительно высоким содержа-

нием никеля и кобальта и поэтому очень дорогих. При этом килограмм поликристаллической нержавеющей стали марки 316 может быть в двадцать раз дешевле поликристаллических жаропрочных сплавов и в две тысячи раз дешевле монокристаллических лопаток той же массы из жаропрочного сплава.

Кроме того, в сердцевине могут быть сформированы один или несколько каналов 3006. Каналы 3006 могут быть выполнены, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее в наружный слой 3002. В некоторых вариантах выполнения наружный слой 3002 может образовывать часть или всю внешнюю поверхность лопатки. Кроме того, наружный слой 3002 может содержать пористый материал, такой как пористый спеченный металл. Соответственно каналы 3006 в сердцевине 3004 могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее в наружный слой 3002. Поэтому транспирационная текучая среда может проходить сквозь наружный слой 3002 турбинной лопатки 2008А и создавать транспирационный слой вдоль внешней поверхности 3008 турбинной лопатки, который может защитить ее от нагрева и(или) соударений с твердыми частицами. В связи с этим должно быть понятно, что турбинная лопатка и(или) другие компоненты систем, раскрытых в данном изобретении, могут иметь транспирационную защиту, означающую, что транспирационная текучая среда направляется по меньшей мере к части их поверхности, вне зависимости от того, что транспирация охлаждает этот компонент. Например, компонент может иметь транспирационную защиту посредством транспирационной текучей среды, которая защищает поверхность компоненты от ударов твердых частиц или других включений вне зависимости от температуры транспирационной текучей среды. И наоборот, компонент может дополнительно или альтернативно иметь транспирационную защиту посредством транспирационной текучей среды, которая охлаждает компонент или действует как барьер, снижающий нагрев компонента.

Как описано ранее, транспирационная текучая среда может дополнительно или альтернативно использоваться в других компонентах, относящихся к раскрытым в данном изобретении системам и узлам. В связи с этим на фиг. 8 изображено поперечное сечение части входного канала 2002А, выполненного с возможностью подачи потока продуктов горения из камеры сгорания в турбину. Входной канал 2002А может содержать внутренний слой 4002 и наружный слой 4004. Наружный слой 4004 может иметь оболочку, которая может содержать прочный металл, как описано выше, служащий для придания прочности входному каналу 2002А. Кроме того, в наружном слое 4004 могут быть сформированы один или несколько каналов 4006. Каналы 4006 могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее во внутренний слой 4002. В некоторых вариантах выполнения внутренний слой 4002 может образовывать часть или всю внутреннюю поверхность 4008 входного канала 2002А. Кроме того, внутренний слой 4002 может содержать пористый материал, такой как пористый спеченный металл. Соответственно каналы 4006 в наружном слое 4004 могут быть выполнены так, чтобы направлять транспирационную текучую среду и направлять ее во внутренний слой 4002. Поэтому транспирационная текучая среда может проходить сквозь внутренний слой 4002 входного канала 2002А и создавать транспирационный слой у внутренней поверхности 4008 входного канала, который может защитить ее от нагрева и(или) соударений с твердыми частицами.

Как показано на фиг. 9, в одном из вариантов выполнения входного канала 2002В могут быть дополнительно обеспечены изоляционный слой 4010 и второй наружный слой 4012. В некоторых вариантах выполнения изоляционный слой 4010 и второй наружный слой 4012 могут покрывать внутренний слой 4002 и наружный слой 4004. Изоляционный слой 4010 может изолировать входной канал 2002В так, чтобы в нем оставалось больше тепла, что может повысить КПД системы, в которой это решение используется. Кроме того, второй наружный слой 4012 может придать дополнительную прочность входному каналу 2002В. Однако слои из различных материалов и свойства, описанные выше, могут дополнительно или альтернативно использоваться также в других компонентах описанных в данном изобретении систем и узлов, например в камере сгорания.

На фиг. 10 приведено продольное сечение турбинной лопатки 2008В согласно альтернативному варианту выполнения. Турбинная лопатка 2008В может содержать один или несколько элементов жесткости, например один или несколько стержней 5014. Стержни 5014 могут содержать металл или другой материал, способный придать прочность турбинной лопатке 2008В.

В турбинной лопатке могут быть также сформированы один или несколько каналов 5006. Каналы 5006 могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее в материал, из которого сформирована турбинная лопатка 2008В. При этом турбинная лопатка 2008В может содержать пористый материал, такой как пористый спеченный металл. Соответственно каналы 5006 в турбинной лопатке 2008В могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее сквозь турбинную лопатку, создавая транспирационный слой у наружной поверхности 5008 турбинной лопатки, который может защитить ее от нагрева и(или) соударений с твердыми частицами.

В некоторых вариантах выполнения турбинная лопатка 2008В может быть выполнена с возможностью формирования потока транспирационной текучей среды у входной кромки 5016 турбинной лопатки, большего, чем поток транспирационной текучей среды у выходной кромки 5018 турбинной лопатки. Это может обеспечить большую защиту входной кромки, что может быть желательным, так как в про-

тивном случае входная кромка может больше повреждаться ударами твердых частиц, чем остальная часть турбинной лопатки. В связи с этим один или несколько каналов 5006 в турбинной лопатке 2008В могут образовывать входную площадь поступления транспирационной текучей среды у входной кромки 5015 (см., например, канал 5006А), которая больше входной площади поступления транспирационной текучей среды одного или нескольких каналов у выходной кромки 5018 (см., например, канал 5006В). Альтернативно у входной кромки может быть сформировано большее число каналов, чем у выходной кромки.

На фиг. 11-13 представлен альтернативный вариант выполнения турбинной лопатки 2008С. Как показано, турбинная лопатка 2008С может представлять собой цельковую конструкцию, содержащую одно или несколько внутренних ребер 6020. Внутренние ребра 6020 могут служить элементами жесткости, придающими прочность турбинной лопатке 2008С. Внутренние ребра 6020 могут быть выполнены водино с наружным слоем 6002 и(или) с элементом 6022 хвостовика турбинной лопатки.

Турбинная лопатка 2008С может содержать один или несколько каналов 6006, которые могут быть разделены внутренними ребрами 6020. Каналы 6006 могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду (например, из ротора, с которым скреплен элемент 6022 хвостовика) и направлять ее сквозь наружный слой 6002. Поэтому турбинная лопатка 2008С может содержать пористый материал, такой как пористый спеченный металл. Соответственно каналы 6006 в турбинной лопатке 2008С могут быть выполнены так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять ее сквозь наружный слой 6002 турбинной лопатки, создавая транспирационный слой у наружной поверхности 6008 турбинной лопатки, который может защитить ее от нагрева и(или) соударений с твердыми частицами. Что также изображено, каналы 6006 в турбинной лопатке 2008С могут образовывать входную площадь поступления транспирационной текучей среды у входной кромки 6016 (см., например, канал 6006А), которая больше входной площади поступления транспирационной текучей среды одного или нескольких каналов у выходной кромки 6018 (см., например, канал 6006В). Соответственно в некоторых вариантах выполнения турбинная лопатка 2008С может быть выполнена с возможностью формирования потока транспирационной текучей среды у входной кромки 6016 турбинной лопатки, большего, чем поток транспирационной текучей среды у выходной кромки 6018 турбинной лопатки.

На фиг. 14 представлено поперечное сечение для дополнительного варианта выполнения турбинной лопатки 2008D. Как показано, турбинная лопатка 2008D может содержать наружный слой 7002, определяющий толщину стенки у выходной кромки 7018, которая больше толщины стенки у входной кромки 7016. При этом турбинная лопатка 2008D может содержать пористый материал, такой как пористый спеченный металл. Соответственно транспирационная текучая среда может направляться через турбинную лопатку 2008D так, чтобы проходить сквозь наружный слой 7002, создавая транспирационный слой у внешней поверхности 7008 турбинной лопатки, который может защитить турбинную лопатку от нагрева и(или) ударов твердых частиц. Так как толщина стенки наружного слоя 7002 больше у выходной кромки 7018, чем у входной кромки 7016, в турбинной лопатке 2008D может формироваться поток транспирационной текучей среды у входной кромки, который больше потока транспирационной текучей среды у выходной кромки.

Кроме того, согласно различным вариантам выполнения, раскрытым в данном изобретении, в турбинных лопатках может быть сформирована пористость, меняющаяся от хвостовика к вершине турбинной лопатки (см., например, хвостовик 6026 и вершину 6028 турбинной лопатки 2008С, показанной на фиг. 13). При этом в некоторых вариантах выполнения турбинные лопатки, раскрытые в данном документе, могут быть выполнены с возможностью формирования потока транспирационной текучей среды у вершины турбинной лопатки, который больше потока транспирационной текучей среды у хвостовика турбинной лопатки. Это может обеспечить турбинные лопатки с дополнительной защитой, которая может быть желательной, так как вершина турбинной лопатки движется с большей скоростью, чем любая другая точка на турбинной лопатке.

Например, на фиг. 15А схематически изображено продольное сечение турбинной лопатки 2008Е. Как показано, в турбинной лопатке 1008Е сформирована пористость, различная от хвостовика 8026 до вершины 8028. В частности, турбинная лопатки 2008Е имеет большую пористость у вершины 8028, чем у хвостовика 8026, так чтобы у вершины лопатки мог выходить относительно больший поток транспирационной текучей среды, чем у хвостовика турбинной лопатки. При этом турбинная лопатка может содержать пористый материал, например пористый спеченный металл, выполненный с возможностью обеспечения сквозь него транспирации текучей среды, как рассмотрено выше. Как показано, в некоторых вариантах выполнения, пористый материал может быть сформирован в несколько слоев 8030А-Д, в которых пористость возрастает от хвостовика к вершине. Слои 8030А-Д могут быть сформированы из разных материалов или из одного и того же материала, который спечен в разной степени, и поэтому его пористость не одинакова. В некоторых вариантах выполнения слои могут быть спрессованы друг с другом, хотя они могут быть скреплены различными способами.

В другом варианте выполнения, представленном на фиг. 15В, в турбинной лопатке 2008Е' сформирована пористость, изменяющаяся от хвостовика 8026' к вершине 8028', как описано выше в отношении фиг. 15А. Однако, как показано, в некоторых вариантах выполнения в пористом материале может быть

сформирован градиент пористости, при котором, например, пористость материала возрастает от хвостовика 8026' к вершине 8028'. При этом пористость материала может быть разной в разных местоположениях без разделения на слои разной пористости, как в некоторых вариантах выполнения.

Могут использоваться различные другие конфигурации турбинных лопаток. Например, в некоторых вариантах турбинные лопатки могут быть выполнены так, чтобы формировать поток транспирационной текучей среды у входной кромки, который в основном равен или меньше потока транспирационной текучей среды у выходной кромки турбинных лопаток. Кроме того, в некоторых вариантах турбинные лопатки могут быть выполнены так, чтобы формировать поток транспирационной текучей среды у вершины, который в основном равен или меньше потока транспирационной текучей среды у хвостовика турбинной лопатки. Больше того, изменения пористости между входной кромкой и выходной кромкой могут быть также использованы для регулирования потока транспирационной текучей среды из лопаток аналогично тому, что описано в отношении регулирования потока транспирационной текучей среды между хвостовиком и вершиной.

При этом, например, пористость материала, из которого сформирована турбинная лопатка (или другой компонент), может возрастать между хвостовиком и вершиной, убывать между хвостовиком и вершиной, быть сравнительно больше или меньше в центре относительно крайних частей лопатки, возрастать или уменьшаться от входной кромки к выходной кромке и т.д. Перепад пористости или пористость слоев может возрастать или понижаться на величину, составляющую приблизительно от 10 до 90% пористости, приблизительно от 25 до 75% пористости или приблизительно от 1 до 25% пористости.

Соответственно транспирационная текучая среда может быть сформирована с возможностью охлаждения и(или) другим образом защиты различных компонентов систем и устройств, раскрытых в данном изобретении. При этом на фиг. 16 изображена расчетная траектория 900 для шлаковой частицы 902 размером 100 мкм относительно внешней поверхности 904 турбинной лопатки 906. Траектория 900 смоделирована, исходя из того, что частица 902 шлака сначала движется со скоростью 75 м/с к турбинной лопатке 906, и при этом скорость потока транспирационной текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , направленного от внешней поверхности 904 турбинной лопатки, составляет 2 м/с.

Циркулирующая текучая среда в турбине может находиться под давлением 300 бар (30 МПа) и при температуре 700°C. Как показано, транспирационная текучая среда 908 предотвращает вхождение шлаковой частицы 902 в контакт с турбинной лопаткой 906. В частности, как подсчитано, шлаковая частица 902 проходит приблизительно в 2 мм от внешней поверхности 904 турбинной лопатки. Соответственно эрозии турбинной лопатки 906 можно избежать.

Аналогично согласно настоящему изобретению на фиг. 17 приведен пример расчетной траектории 1000 шлаковой частицы 1002 размером 50 мкм относительно внутренней поверхности 1004 камеры сгорания. Траектория 1000 шлаковой частицы смоделирована, исходя из того, что шлаковая частица 1002 сначала движется со скоростью 50 м/с перпендикулярно внутренней поверхности 1004 камеры 1006 сгорания при направленной по оси скорости потока продуктов горения, составляющей приблизительно 3 м/с, и при этом продукты горения более чем на 90% состоят из  $\text{CO}_2$ , температура продуктов горения составляет приблизительно 1500°C, давление приблизительно 300 бар (30 МПа) и радиальная скорость транспирационного потока транспирационной текучей среды 1008 составляет приблизительно 1 м/с (например, перпендикулярно направленному по оси потоку продуктов горения). Как показано, транспирационная текучая среда 1008 предотвращает вхождение шлаковой частицы 1002 в контакт с внутренней поверхностью 1004 камеры 1006 сгорания. Подсчитано, что шлаковая частица 1002 проходит на расстоянии всего лишь 0,2 мм от внутренней поверхности 1004 камеры 1006 сгорания. Соответственно эрозии внутренней поверхности 1004 камеры 1006 сгорания можно избежать.

Ниже в табл. 1 приведены различные параметры работы обычной, действующей на природном газе турбины, входящей в энергетическую установку. Поперечное сечение такой типовой турбины 1100 изображено на фиг. 18. Для сравнения ниже в табл. 2 приведены те же параметры работы турбины, действующей при высоком давлении и низкой скорости согласно настоящему изобретению. На фиг. 19 дано поперечное сечение приведенной в качестве примера турбины 1200, выполненной в соответствии с настоящим изобретением. Как можно видеть из сравнения обычной турбины 1100 с турбиной 1200, выполненной по настоящему изобретению, последняя может иметь относительно меньший диаметр благодаря тому, что в турбине, выполненной по настоящему изобретению, используются относительно более короткие турбинные лопатки 2008F по сравнению с турбинными лопатками 1108 обычной турбины. При этом, как показано в следующих таблицах, в некоторых вариантах турбинные лопатки 2008F турбины 1200, выполненной по настоящему изобретению, могут определять относительно меньший средний внутренний радиус (то есть расстояние от центра ротора 2006F до хвостовика турбинной лопатки), средний внешний радиус (то есть расстояние от центра ротора до вершины турбинной лопатки) и средний радиус (среднее между внутренним и внешним радиусами) по сравнению с турбинными лопатками 1108 обычной турбины 1100. У турбины 1200, выполненной согласно настоящему изобретению, может быть сравнительно большее отношение длины к диаметру, чем у обычной турбины 1100. Кроме того, турбина 1200, выполненная согласно настоящему изобретению, может содержать относительно большее число турбинных лопаток 2008F по сравнению с обычной турбиной 1100. Кроме того, диаметр ротора 2006F

турбины 1200, выполненной по настоящему изобретению, может быть меньше диаметра ротора 1106 обычной турбины 1100.

Таблица 1

Обычная конструкция	
Параметр	Значение
Требуемая мощность электрогенератора	$2,5 \times 10^8$ Вт
Давление на входе турбины	15 бар (1,5 МПа)
Давление на выходе турбины	1 бар (0,1 МПа)
Температура потока продуктов горения	1623 К (1350°C)
Плотность потока	$0,75 \text{ кг/м}^3$
Скорость потока	700 миль/час (310 м/с)
Длина турбины	10 м
Диаметр турбины	4 м
Число лопаток	200

Таблица 2

Предлагаемая в изобретении конструкция	
Параметр	Значение
Требуемая мощность электрогенератора	$2,5 \times 10^8$ Вт
Давление на входе турбины	300 бар (30 МПа)
Давление на выходе турбины	30 бар (3 МПа)
Температура потока продуктов горения	1400 К (1127°C)
Плотность потока	$70 \text{ кг/м}^3$
Скорость потока	100 миль/час (44 м/с)
Длина турбины	5 м
Диаметр турбины	1,5 м
Число лопаток	1,000

Многие модификации и другие варианты выполнения изобретения, отличающиеся от приведенных в данном описании, могут прийти на ум специалисту в данной области, которому данное описание предоставляет преимущества, заключающиеся в изложенных в нем идеях. Поэтому должно быть понятно, что изобретение не ограничено конкретными приведенными частными вариантами выполнения и модификациями и в объем изобретения, определяемый приложенной формулой изобретения, должны быть включены другие частные варианты выполнения. Хотя в данном описании использованы специфические термины, они используются исключительно в общепринятом и описательном смысле, а не в целях внесения ограничений.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Турбинное устройство, содержащее группу компонентов, включающую кожух, формирующий входную часть, выполненную так, чтобы принимать поток продуктов горения, и выходную часть; ротор, установленный в кожухе; и группу лопаток, отходящих от ротора, при этом лопатки включают пористый спеченный материал и скомпонованы так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности и формировать поток транспирационной текучей среды у входной кромки лопатки, который превышает поток транспирационной текучей среды у выходной кромки лопатки.
2. Устройство по п.1, в котором пористый спеченный материал формирует всю внешнюю поверхность турбинных лопаток.
3. Устройство по п.1, в котором кожух включает пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внутренней поверхности кожуха.
4. Устройство по п.1, в котором ротор включает пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности ротора.
5. Устройство по п.1, в котором ротор содержит узел формирования кольцевого потока, выполненный так, чтобы отклонять поток продуктов горения вокруг ротора.
6. Устройство по п.1, содержащее входной канал, соединенный с входной частью кожуха и выполненный так, чтобы подсоединяться к выходу устройства камеры сгорания и принимать из него поток продуктов горения, при этом входной включает (содержит) пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внутренней поверхности входного канала.
7. Устройство по п.1, в котором входная часть кожуха выполнена так, чтобы непосредственно подсоединяться к выходу устройства камеры сгорания.
8. Устройство по п.7, в котором входная часть кожуха выполнена так, чтобы принимать поток продуктов горения от группы камер сгорания, размещенных по радиусу относительно главной оси, сформир-

рованной ротором.

9. Устройство по п.1, в котором лопатки соответственно содержат по меньшей мере один элемент жесткости.

10. Устройство по п.9, в котором элемент жесткости включает стержень, проходящий сквозь пористый спеченный материал в каждой из лопаток.

11. Устройство по п.10, в котором элемент жесткости содержит сердцевину, вокруг которой находится пористый спеченный материал.

12. Устройство по п.11, в котором в сердцевине сформированы один или несколько каналов, выполненных так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять транспирационную текучую среду в пористый спеченный материал.

13. Устройство по п.1, в котором в лопатках сформированы один или несколько каналов, выполненных так, чтобы принимать транспирационную текучую среду и направлять транспирационную текучую среду в пористый спеченный материал.

14. Устройство по п.1, в котором в каждой из турбинных лопаток сформирована поверхность поступления транспирационной текучей среды у входной кромки, которая больше, чем поверхность поступления текучей среды у выходной кромки.

15. Устройство по п.1, в котором в каждой из турбинных лопаток сформирована стенка, толщина которой больше у выходной кромки, чем у входной кромки.

16. Устройство по п.1, в котором каждая из турбинных лопаток имеет протяженность от хвостовика, расположенного у ротора, до вершины, и при этом в пористом спеченном элементе сформирована пористость, меняющаяся между хвостовиком и вершиной.

17. Устройство по п.16, в котором пористость пористого спеченного материала сформирована так, чтобы создавать поток транспирационной текучей среды у вершины, который больше потока транспирационной текучей среды у хвостовика.

18. Устройство по п.16, в котором пористость пористого спеченного материала сформирована так, чтобы создавать поток транспирационной текучей среды у вершины, который в основном равен потоку транспирационной текучей среды у хвостовика.

19. Устройство по п.16, в котором пористость пористого спеченного материала определена несколькими слоями, пористость которых возрастает от хвостовика к вершине.

20. Устройство по п.1, в котором каждая из лопаток представляет собой цельковую конструкцию, содержащую группу внутренних ребер.

21. Устройство по п.1, в котором упомянутые компоненты включают группу статоров, содержащих пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности статоров.

22. Устройство по п.1, содержащее одно или несколько уплотнений, причем один или несколько компонентов выполнены так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к уплотнениям.

23. Устройство по п.22, в котором уплотнения содержат пористый спеченный материал.

24. Устройство по п.1, в котором отношение длины турбинного устройства к среднему диаметру лопаток больше приблизительно 3,5.

25. Устройство по п.24, в котором турбинные лопатки имеют высоту лопатки менее приблизительно 0,275 м.

26. Устройство по п.24, содержащее менее приблизительно 2000 лопаток.

27. Способ выработки энергии, в котором

вводят топливо,  $O_2$  и циркулирующую текучую среду на основе  $CO_2$  в камеру сгорания;

сжигают топливо с обеспечением потока продуктов горения, содержащего  $CO_2$ ;

осуществляют расширение потока продуктов горения в турбине, содержащей группу турбинных лопаток и имеющей отношение длины турбины к среднему диаметру турбинных лопаток, большее приблизительно 3,5, обеспечивая выработку энергии и выходной поток турбины, причем турбинные лопатки включают пористый спеченный материал и скомпонованы так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности и формировать поток транспирационной текучей среды у входной кромки лопатки, который превышает поток транспирационной текучей среды у выходной кромки лопатки;

обрабатывают выходной поток турбины, направляя по меньшей мере часть циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  обратно в камеру сгорания;

отводят часть используемой повторно циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$ ; и

используют рециклированную циркулирующую текучую среду на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды.

28. Способ по п.27, в котором использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды включает транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в турбине.

29. Способ по п.27, в котором использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в качестве транспирационной текучей среды включает транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $CO_2$  в камере сгорания.

30. Способ по п.27, в котором направляют поток продуктов горения из камеры сгорания через канал в турбину, при этом использование рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в качестве транспирационной текучей среды включает транспирацию рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в канале.

31. Способ по п.27, включающий доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  до температуры, меньшей температуры потока продуктов горения.

32. Способ по п.27, включающий доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  до температуры, в основном равной температуре потока продуктов горения.

33. Способ по п.27, включающий доведение рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  до температуры, большей температуры потока продуктов горения.

34. Система выработки энергии, включающая

камеру сгорания, выполненную так, чтобы принимать топливо,  $\text{O}_2$  и поток циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , и имеющую по меньшей мере одну ступень горения, на которой сжигается топливо в присутствии потока циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  и обеспечивается поток продуктов горения, содержащий  $\text{CO}_2$ ;

турбину, сообщающуюся с камерой сгорания и имеющую входную часть, служащую для приема потока продуктов горения, и выходную часть, служащую для выпуска выходного потока турбины, содержащего  $\text{CO}_2$ , а также группу турбинных лопаток, причем отношение длины турбины к среднему диаметру турбинных лопаток больше приблизительно 3,5 и турбинные лопатки включают пористый спеченный материал и скомпонованы так, чтобы направлять транспирационную текучую среду к внешней поверхности и формировать поток транспирационной текучей среды у входной кромки лопатки, который больше потока транспирационной текучей среды у выходной кромки лопатки;

один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ ,

при этом один или несколько компонентов системы выполнены так, чтобы использовать часть потока рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в качестве транспирационной текучей среды.

35. Система по п.34, в которой один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , содержат фильтр.

36. Система по п.35, в которой один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , содержат теплообменник.

37. Система по п.36, в которой один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , содержат сепаратор.

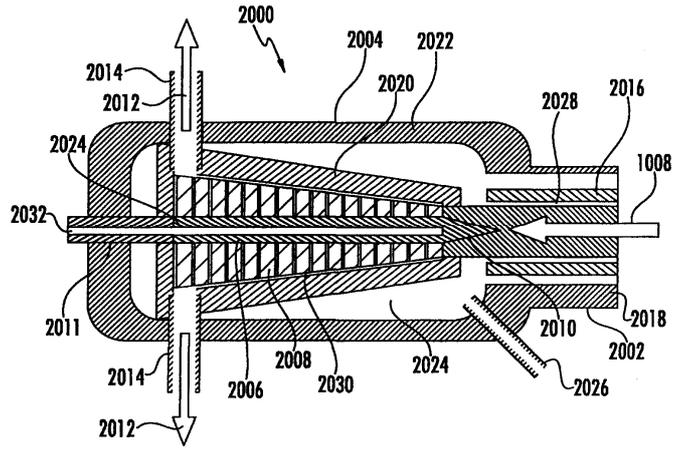
38. Система по п.37, в которой один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы обрабатывать выходной поток турбины, формируя поток рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$ , содержат компрессор.

39. Система по п.34, в которой один или несколько компонентов, выполненных так, чтобы использовать часть потока рециклированной циркулирующей текучей среды на основе  $\text{CO}_2$  в качестве транспирационной текучей среды, содержат пористый спеченный материал, скомпонованный так, чтобы принимать транспирационную текучую среду, проходящую сквозь него.

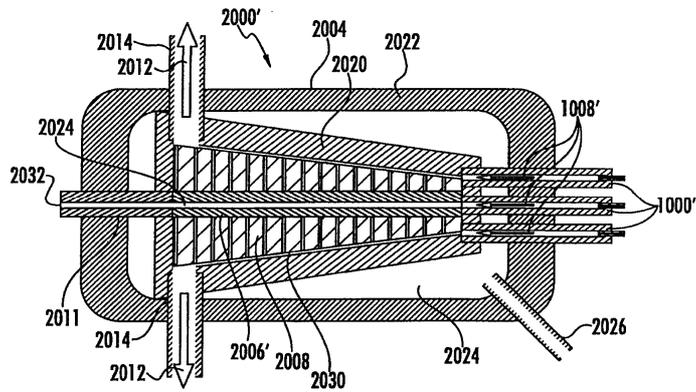
40. Система по п.37, в которой турбинные лопатки имеют высоту лопатки менее приблизительно 0,275 м.

41. Система по п.37, в которой турбина содержит менее приблизительно 2000 турбинных лопаток.

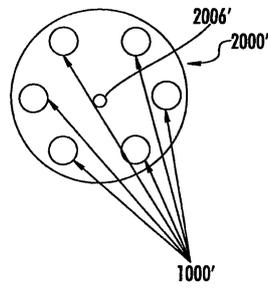




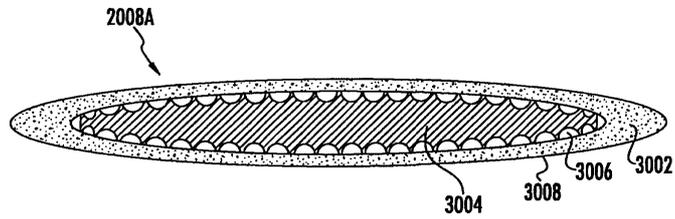
Фиг. 4



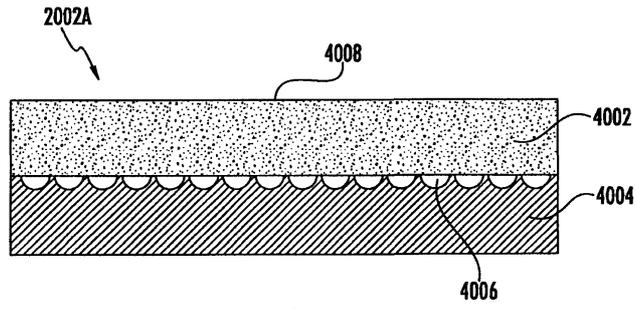
Фиг. 5



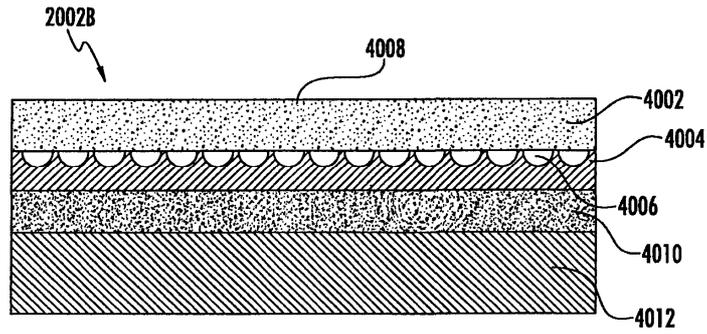
Фиг. 6



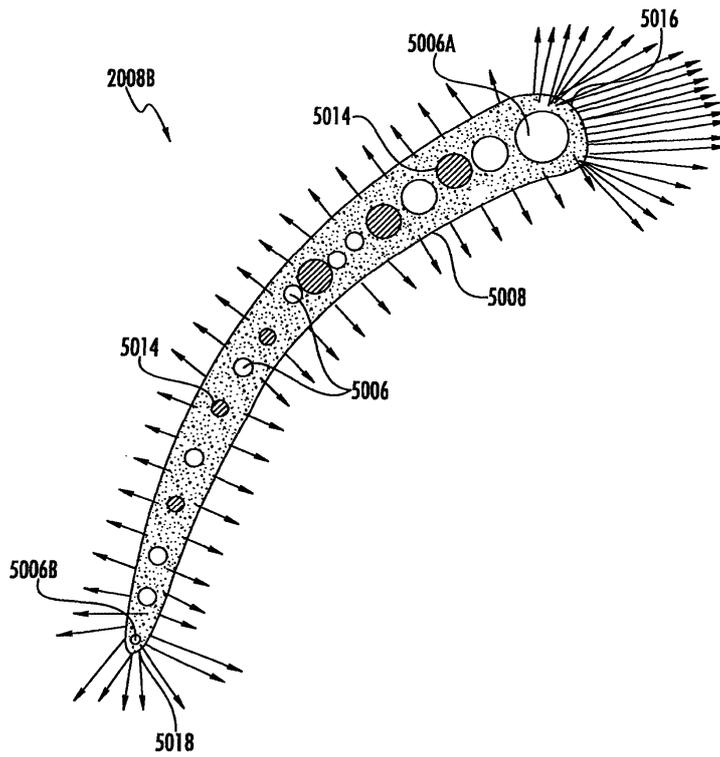
Фиг. 7



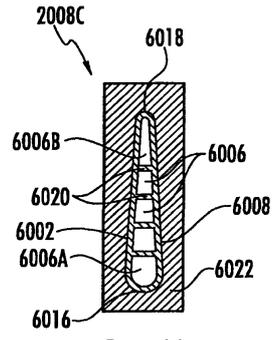
Фиг. 8



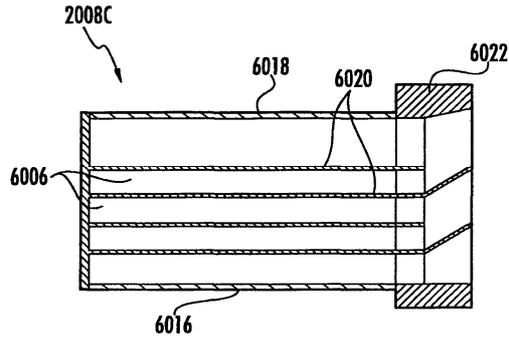
Фиг. 9



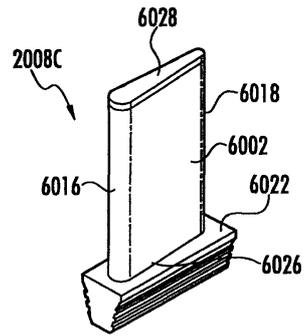
Фиг. 10



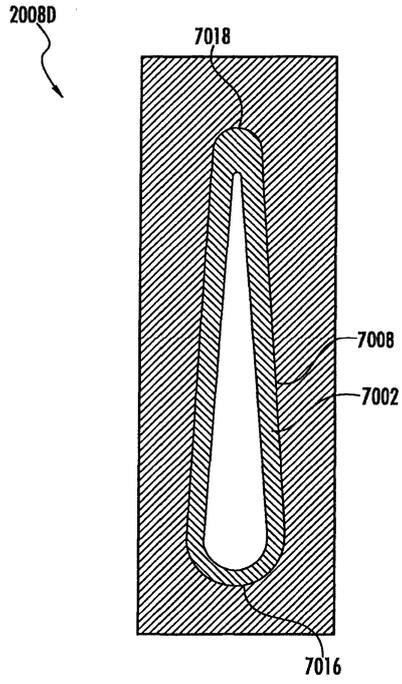
Фиг. 11



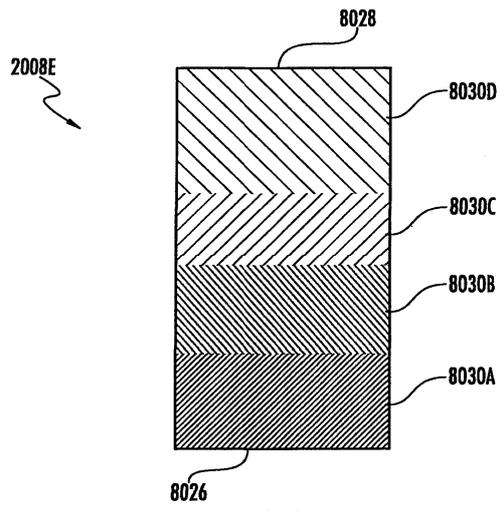
Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14

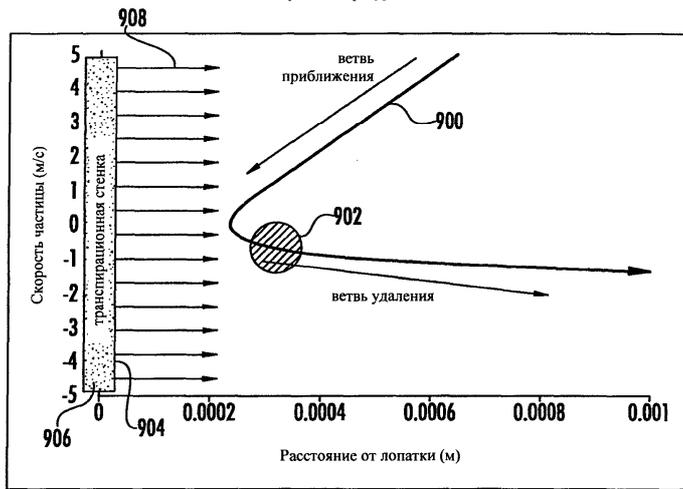


Фиг. 15А



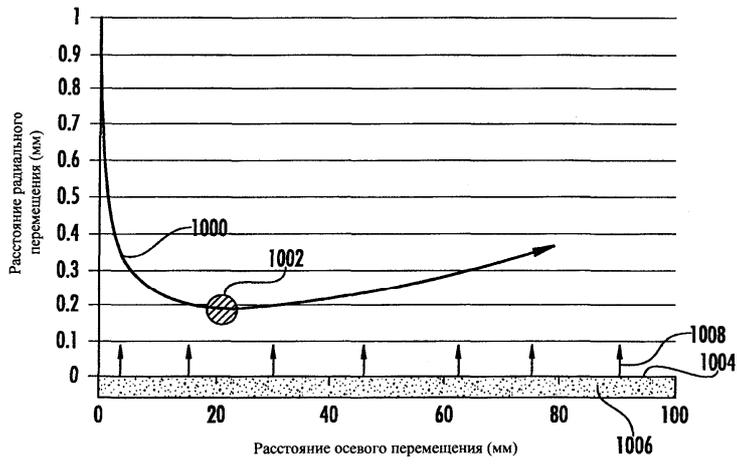
Фиг. 15Б

Расчетная траектория шлаковой частицы размером 100 мкм при ее начальной скорости 75 м/с, при скорости транспирационного потока 2 м/с и при потоке CO<sub>2</sub> с давлением 300 бар и температурой 700°

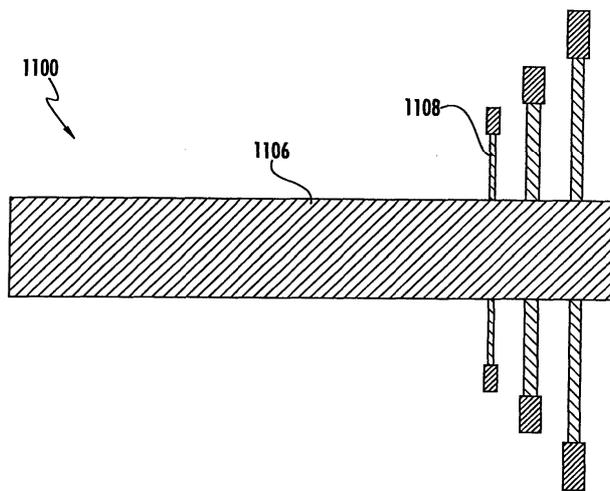


Фиг. 16

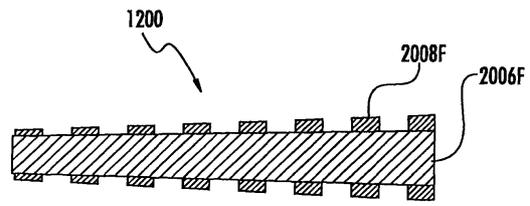
Траектория шлаковой частицы размером 50 мкм с начальной скоростью 50 м/с, направленной перпендикулярно стенке камеры сгорания



Фиг. 17



Фиг. 18



Фиг. 19



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

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

---