

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 8094

(13) С1

(46) 2006.06.30

(51)<sup>7</sup> F 01D 25/12, 25/14,  
25/30

## (54) СПОСОБ ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫХЛОПНОЙ ЧАСТИ ЦИЛИНДРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

(21) Номер заявки: а 20020831

(22) 2002.10.21

(43) 2004.06.30

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

(72) Авторы: Хаимов Вячеслав Аркадьевич (RU); Воронов Евгений Олегович (ВУ); Кашеев Владимир Петрович (ВУ); Сорокин Владимир Николаевич (ВУ)

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

(56) SU 1041712 A, 1983.

SU 877090, 1981.

SU 306268, 1971.

SU 878975, 1981.

US 5257906 A, 1993.

EP 0600129 A1 1994.

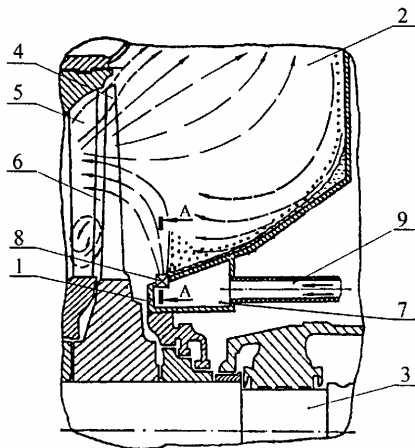
WO 99/61758 A3.

JP 6193408 A, 1994.

(57)

1. Способ заградительного охлаждения выхлопной части цилиндра низкого давления паровых турбин, включающий подвод потока пара к корневой части последней ступени рабочего колеса внутри выхлопного патрубка цилиндра низкого давления и образование заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока, отличающийся тем, что заградительный охлаждающий кольцевой закрученный поток формируют в виде слоя мелкодисперсных капель воды в движущемся кольцевом закрученном потоке пара путем ввода в последний конденсата до и после или только после формирования кольцевого закрученного потока пара.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что пару на входе в заградительный охлаждающий кольцевой закрученный поток придают скорость в пределах 1,2-3 линейных скоростей лопаток последней ступени рабочего колеса на их максимальном радиусе.



Фиг. 1

ВУ 8094 С1 2006.06.30

3. Способ по п. 1 или 2, **отличающийся** тем, что при подаче конденсата в поток пара до формирования кольцевого закрученного потока пара отношение массы мелкодисперсных капель конденсата и массы пара выбирают в пределах 0,5-4,0: 1.

4. Способ по п. 1 или 2, **отличающийся** тем, что расход пара, используемого для системы заградительного охлаждения выхлопной части цилиндра низкого давления паровых турбин, составляет 0,5-1 % от номинального расхода пара через турбину.

5. Способ по любому из пп. 1-4, **отличающийся** тем, что потоку пара на входе в заградительный охлаждающий кольцевой закрученный поток придают энергию, достаточную для дробления капель и пленки жидкости, идущих из конденсатора в составе парожидкостной смеси - от 40 до 500 кДж на 1 м<sup>3</sup> пара.

6. Способ по любому из пп. 1-5, **отличающийся** тем, что в корневой части заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока, равной примерно 1/3 длины лопатки последней ступени рабочего колеса, создают полное давление, превышающее давления в конденсаторе и в межлопаточном пространстве последней ступени рабочего колеса.

7. Способ по любому из пп. 1-6, **отличающийся** тем, что в средней по радиусу части заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока вблизи выхода из последней ступени рабочего колеса за счет перепада давлений в потоке и межлопаточном пространстве создают условия для прохода потока влажного насыщенного пара через межлопаточное пространство рабочего колеса внутрь цилиндра низкого давления и его охлаждения.

8. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что потоку пара на входе в заградительный охлаждающий кольцевой закрученный поток придают вращение, попутное вращению рабочего колеса.

---

Изобретение относится к энергетике, к тепловым и атомным электростанциям, а именно к их паровым турбинам, в частности к улучшению работы их цилиндров низкого давления и выхлопных патрубков

Как известно, при работе паровых турбин с малыми расходами пара через часть низкого давления (режим холостого хода, пусковые операции, большие теплофикационные нагрузки теплофикационных турбин) в выхлопной части возникают обратные потоки пароводяной смеси из конденсатора. Это происходит из-за работы последних (или даже всех) ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД) в вентиляторном режиме с потреблением мощности. Рабочие лопатки при этом подводят пару энергию, нагревая и оттесняя его на периферию, к статору, где растет давление, заставляющее пар двигаться из ЦНД в конденсатор. В центре рабочего колеса, вблизи вала создается разряжение, из-за которого и поступает обратный поток из конденсатора. В периферийной области создаются области с высокой температурой (в три-пять раз превышающей среднюю температуру), что может привести к короблению элементов ЦНД, отслоению стеллитовых накладок (паяных) и возникновению вибраций. Крупнодисперсная влага обратного потока из конденсатора, взаимодействуя с лопатками, вызывает их эрозионные повреждения. Эти эрозионные процессы сокращают срок работы лопаточного аппарата и способны привести к аварийной ситуации.

Известен способ охлаждения ступеней низкого давления вводом охладителя в паровую часть ЦНД [1, 2, 3].

В этом способе охлаждение ступеней низкого давления осуществляется последовательным пропуском пара через все ступени. При этом пар имеет или свои обычные параметры перед ЦНД или параметры, заданные в специальном охлаждающем устройстве. К недостаткам этого способа можно отнести то, что этот способ хорошо работает только при достаточно больших расходах пара (без предварительного охлаждения - до 6-7 % от номинального расхода при нормальном давлении в конденсаторе и выше при повышенных давлениях, около 2 % при предварительном охлаждении пара).

Известен способ охлаждения ступеней низкого давления вводом охлаждающего пара между ступенями [4].

## ВУ 8094 С1 2006.06.30

Так как наибольший разогрев в ЦНД наблюдается на последней ступени, то очевидно, что эффективность охлаждения будет наибольшей при подводе пара-охладителя именно к этой ступени. В этом способе расходы пара на охлаждение, несмотря на использование его в сухом насыщенном состоянии, не превышают расходов для идентичных режимов в охлаждающем устройстве с подачей влажного пара в паровпускную часть ЦНД.

Недостатком этого способа является достаточно большой расход пара на охлаждение.

Наиболее распространен в мировой энергетике способ охлаждения ЦНД при помощи ввода охладителя (мелкодисперсных капель конденсата из распыливающих форсунок) в его выхлопную часть [5].

Этот способ можно использовать даже в режимах с нулевым пропуском пара в ЦНД.

Недостатками этого способа являются:

охлаждающие потоки слабо проникают внутрь проточной части ЦНД, поэтому температура в начале проточной части этого цилиндра выше, чем в его конце,

возможен эрозионный износ выходных кромок рабочих лопаток последних ступеней в их наиболее нагруженных корневых зонах,

невозможность длительного использования,

неприменимость при давлении в конденсаторе более 10 кПа из-за сильной эрозии лопаток последней ступени.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому способу является способ заградительного охлаждения выхлопной части цилиндра низкого давления паровых турбин, включающий создание заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока пара вблизи корневой части последней ступени рабочего колеса внутри выхлопного патрубка ЦНД [6].

Недостатками данного способа являются необходимость подачи в систему охлаждения предварительно охлажденного пара, причем влажного (т.е. содержащего капли воды), его достаточно большой расход, отсутствие гарантии того, что эти капли воды и вода из конденсатора не попадут на рабочие лопатки. Недостатком также является и увеличение мощности, затрачиваемой на вентиляторный режим работы ЦНД с ростом расхода охлаждаемого пара (по сравнению с последним аналогом) и недостаточное охлаждение средней части лопаток, где происходит столкновение идущего в конденсатор потока пара из ЦНД и встречного заградительного.

Задачей настоящего изобретения является создание способа, обеспечивающего надежное и равномерное охлаждение ЦНД без попадания капель влаги на лопатки (т.е. исключая их капельную эрозию), требующий малого расхода пара для охлаждения, обеспечивающий малые затраты мощности на вентиляторный режим.

В результате решения данной задачи достигается новый технический результат, заключающийся в возможности надежного охлаждения элементов проточной части ЦНД и выхлопного патрубка, исключения эрозии выходных кромок лопаток из-за прекращения попадания на них капель влаги, уменьшения расхода пара на охлаждение, уменьшения мощности турбины, затрачиваемой на вентиляторный режим и увеличение выработки тепловой энергии из-за снижения расхода пара в конденсатор и потерь теплоты в холодном источнике.

Данный технический результат достигается тем, что в способе заградительного охлаждения выхлопной части цилиндра низкого давления паровых турбин, включающем подвод пара к корневой части последней ступени рабочего колеса внутри выхлопного патрубка ЦНД и образование заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока, этот поток формируют в виде слоя мелкодисперсных капель воды в движущемся кольцевом закрученном потоке пара путем ввода в него конденсата до и после или только после формирования кольцевого закрученного потока пара. Поток пара на входе в охлаждающий кольцевой закрученный слон придают скорость в пределах 1,2-3 линейных скоростей рабочих лопаток последней ступени на их максимальном радиусе. При подаче конденсата до кольцевого слоя отношение масс мелкодисперсных капель и пара на входе в охлаждающий кольцевой заградительный поток выбирают в пределах 0,5-4,0 к 1. При нормаль-

# ВУ 8094 С1 2006.06.30

ной работе общий расход заградительного пара составляет 0,5-1 % от номинального расхода пара через турбину. В оптимальном варианте заграждающему пару на выходе из направляющего аппарата придают энергию, достаточную для дробления капель и пленки жидкости, идущих из конденсатора и составе парожидкостной смеси - от 40 до 500 кДж на 1 м<sup>3</sup> пара. В рабочем режиме в корневой части струи, равной примерно 1/3 длины рабочей лопатки последней ступени, создают полное (т.е. равное сумме статического, динамического и возникающего за счет перевода жидкости в пар) давление, превышающее давления в конденсаторе и в межлопаточном пространстве рабочего колеса. В средней по радиусу части заградительного охлаждающего кольцевого закрученного потока вблизи выхода из последней ступени рабочего колеса за счет перепада давлений в потоке и межлопаточном пространстве создают условия для прохода потока влажного насыщенного пара через межлопаточное пространство рабочего колеса внутрь цилиндра низкого давления и его охлаждения.

Потоку пара заградительного охлаждения придают вращение, попутное вращению рабочего колеса. Согласно изобретению, заградительный пар вводят в межлопаточное пространство рабочего колеса так, чтобы максимально использовать эффект Ранка (минимальная температура на лопатках от этого эффекта достигается в наименее напряженном сечении лопатки).

Поясним физическую сущность изобретения.

Установка устройства заградительного охлаждения, исключающего контакт крупных капель воды, поступающей из конденсатора, с лопатками рабочего колеса последней ступени ЦНД, должна обеспечить изменение направления движения этих капель жидкости с осевого, к лопаткам, на радиальное, параллельное лопаткам, на коротком отрезке осевого пути, равном ширине заградительной кольцевой струи.

Положительный эффект изменения траектории крупной капли достигается за счет передачи ей определенного количества движения от струи пара в радиальном направлении, равного произведению радиальной составляющей скорости пара на его массу. Если количества движения пара в радиальном направлении окажется недостаточным для отклонения крупной капли на ширине струи пара, то капля попадет на лопатки. Что и происходило при наличии одной кольцевой струи влажного пара [7].

Поэтому для надежного процесса отклонения крупных капель были вынуждены использовать две кольцевые струи пара [6]. Однако, удвоение числа кольцевых струй приводит к увеличению расхода пара.

Целью изобретения является повышение уровня охлаждения последних ступеней ЦНД при одновременном снижении расхода пара за счет использования в качестве охладителя воды, забрасываемой из конденсатора, т.е. той воды, которая разрушает лопатки (обращаем вред на пользу).

Для того, чтобы вода, забрасываемая из конденсатора, могла использоваться как охладитель, и крупные капли, и пленка конденсата, движущаяся вдоль стенок, должны быть раздроблены на капли размером порядка 10 мкм. Необходимо совершить работу, идущую на образование новой поверхности конденсата (преодоление силы поверхностного натяжения), работу дробления. Для этого кольцевой охлаждающей струе необходимо сообщить определенную кинетическую энергию. Ее величина зависит от конкретных условий. Как известно, она прямо пропорциональна квадрату скорости. Но увеличивать кинетическую энергию пара за счет увеличения его скорости выше определенных границ нельзя. Это приведет к увеличению расхода пара, а не к его уменьшению, согласно цели изобретения. В этом случае в предлагаемом способе увеличение кинетической энергии охлаждающего пара достигается за счет повышения плотности (удельной массы) влажного пара путем введения в него конденсата до места формирования кольцевой струи пара (например, до направляющего аппарата, в нем самом или же на выходе из него).

Как показали экспериментальные исследования системы заградительного охлаждения ЦНД, предварительное увлажнение заграждающего пара позволяет снизить расход пара при любых добавках конденсата. Но оказалось, что при введении в пар конденсата в коли-

## ВУ 8094 С1 2006.06.30

честве, равном половине массы пара, происходит не только изменение траектории, но и процесс дробления капель и пленки жидкости, забрасываемой из конденсатора в выхлопной патрубок. При максимальных забросах жидкости из конденсатора для дробления ее на мелкие капли требовалась масса конденсата, вводимого в пар, равная четырем массам пара.

Как уже указывалось выше, дробление жидких пленок и крупных капель велось до размеров порядка 10 мкм. Капли такого размера ниже пороговых размеров повреждения лопаточных сталей до их скоростей, равных утроенной линейной скорости концов лопаток последней ступени ЦНД. Появление в кольцевой струе пара наряду с каплями, меньшими 0,1 мкм ( $10^{-7}$  м) капель порядка 10 мкм увеличивает дальность струи пара по двум причинам. Во-первых, парусность капель размером порядка 10 мкм в 100 раз меньше чем у капель диаметром 0,1 мкм, а масса в миллион раз больше. Поэтому такие капли движутся по инерции на расстояние до 0,8 м. Во-вторых, появление капель размером 10 мкм резко сокращает масштаб турбулентных пульсаций пара, являющихся причиной потери устойчивости струи и ее разрушения. В-третьих, появление капель с размерами в 100 раз большими, чем у прототипа, увеличило время, идущее на их испарение, т.е. фазовый переход (и отбор тепла на этот процесс) стал более равномерным по всему межлопаточному объему последних ступеней ЦНД (и, следовательно, улучшилось их охлаждение).

Таким образом, применение предполагаемого изобретения обеспечивает по сравнению с прототипом:

снижение расхода пара в 2-3 раза,

существенно лучшее охлаждение лопаток последних ступеней ЦНД (примерно на 30-50 °С),

упрощение конструкции устройства охлаждения за счет устранения второй заградительной ступени.

Отличительной особенностью данного изобретения является то, что в нижней (корневой) части струи создают полное давление (статическое, динамическое и возникающее за счет перевода жидкости в пар), большее давлений в конденсаторе и в последней ступени рабочего колеса. Благодаря этому пароводяная смесь из конденсатора не может попасть на рабочие лопатки этой части колеса. Если бы полное давление там было меньше, обратный поток из конденсатора "пробивал" бы заградительное "препятствие" и попадал бы на рабочие лопатки. В средней (по радиусу) части рабочего колеса за счет перепада давлений в потоке и межлопаточном пространстве из-за торможения потока (переводящего динамическое давление в статическое), испарения капель воды, увеличения (которое прямо пропорционально квадрату радиуса) объема, занимаемого заградительным паром, появления осевой составляющей скорости (направленной внутрь ЦНД) в заградительном потоке из-за воздействия кинетической энергии обратного потока пароводяной смеси из конденсатора, создают условия для прохода влажного насыщенного пара, состоящего из смеси части заградительного пара и обратного потока из конденсатора, содержащего воду в мелкодисперсном состоянии после дробления ее в заградительном слое, через межлопаточное пространство в проточную часть ЦПД и ее хорошего охлаждения. Верхняя часть ЦНД охлаждается из-за прокачивания этой смеси рабочими лопатками, работающими в вентиляторном режиме. Нижняя часть ЦНД охлаждается из-за вентиляторного режима ступеней и эффекта Ранка, приводящего к охлаждению центра вращающейся паровой или газовой системы. Если пар на выходе из направляющего аппарата не будет обладать энергией, необходимой для гарантированного дробления любых по размерам капель и пленки воды, жидкая фаза будет попадать в проточную часть ЦНД со всеми вытекающими последствиями. При скорости пара на выходе из направляющего аппарата, равной 1,2-3 линейной скорости рабочей лопатки последней ступени на ее максимальном радиусе, как раз и достигаются нужные давления по радиусу рабочего колеса при обычных для современной энергетики параметрах пара, размерах турбин и скоростях вращения их роторов, к тому же дальнейшее увеличение скорости труднее осуществимо и удорожает систему заградительного охлаждения. Меньшие же указанного интервала скорости пара не обеспечивают нужных давлений по радиусу рабочего колеса, и пар не обладает нужной энергией для

## ВУ 8094 С1 2006.06.30

дробления влаги, создания из нее мелкодисперсной туманообразной системы, где капельки воды настолько мелки, что обладают эффектом витания. Есть ли необходимость в применении пароохладителя для получения охлажденного пара или можно использовать перегретый пар непосредственно из отборов, требуется ли влажный насыщенный пар или лучше использовать сухой, какова наилучшая температура охлаждающего пара, - это зависит от конкретных условий - давления в конденсаторе, качества работы (плотности) поворотных диафрагм, вида малорасходного режима (режим пуска, холостого хода, теплофикационные режимы с одно- или двухступенчатым подогревом сетевой воды и ограниченным до минимальной величины расходом пара через проточную часть низкого давления), установленного оборудования и т.д. Но чем меньше влаги содержит обратный поток из конденсатора, тем ниже (ближе к температуре насыщения) должна быть температура заградительного пара.

Эксперименты показали, что для реальных условий современных марок энергетических турбин для нормальной работы заградительного охлаждения достаточен расход охлаждающего заградительного пара в размере (0,5-1) % от номинального расхода через турбину. При меньших расходах просто не обеспечивается требуемое для безопасной работы охлаждение проточной части ЦНД и выходные кромки рабочих лопаток не защищены от капельной эрозии. Большие указанного интервала расходы пара вначале приводят к увеличению стоимости системы заградительного охлаждения, уменьшению выработки турбиной тепловой энергии, к возрастанию потерь теплоты в холодном источнике, а при расходах пара, в 3-4 раза превышающих оптимальные, система просто перестает работать. Если вводить заградительный пар в проточную часть ЦНД в другом месте, например, вблизи вала турбины, то не исключено попадание капельной влаги на выходные кромки рабочих лопаток, их корневую часть. При введении пара в верхнюю часть межлопаточного пространства рабочего колеса нарушается система охлаждения проточной части ЦНД из-за столкновения потоков пара из ЦНД (рабочие лопатки, работая как вентилятор, отбрасывают пар на периферию) и встречного потока пара заградительного охлаждения.

Изобретение поясняется описанием конкретного, но не ограничивающего настоящего изобретения, варианта выполнения и прилагаемым чертежом.

На фиг. 1 изображено устройство, реализующее предложенный способ (продольный разрез). На фиг. 2 показано поперечное сечение по А-А фиг. 1 направляющего аппарата системы заградительного охлаждения (один из возможных вариантов, с соплами Ловаля для получения на выходе сверхзвуковой скорости требуемой величины).

Устройство 1 заградительного охлаждения находится в выхлопном патрубке 2 цилиндра низкого давления. ЦНД имеет вал 3, рабочие 4, неподвижные 5 лопатки, межлопаточное пространство 6. Устройство 1 охлаждения включает кольцевые камеры 7 с направляющими аппаратами 8, паропроводы 9 для подачи пара. В направляющем аппарате 8 находятся профильные лопатки 10, расположенные под определенным углом. Торцевые стенки 11 направляющего аппарата 8 и фигурные лопатки 10 образуют требуемую (нужную для придания пару определенных скорости и направления) форму паропроводящего канала (в данном частном случае - сопло 12 Лавалья).

Способ осуществляют следующим образом.

Заградительный пар, выходя из направляющего аппарата 8, дробит капельную и пленочную влагу обратного потока из конденсатора, натекающую на направляющий аппарат 8. Образуется мелкодисперсная пароводяная смесь. Создаваемая паром из направляющего аппарата 8 вращающаяся кольцевая струя препятствует проникновению к корневой части рабочего колеса обратного потока из конденсатора.

В средней (по радиусу) части рабочего колеса образованная мелкодисперсная пароводяная смесь поступает в проточную часть ЦНД через межлопаточное пространство 6, охлаждая его элементы. Под действием вентиляторного эффекта пар проходит через периферийную часть ЦНД и направляется через выхлопной патрубок 2, охлаждая его, в конденсатор.

# ВУ 8094 С1 2006.06.30

Пример осуществления способа.

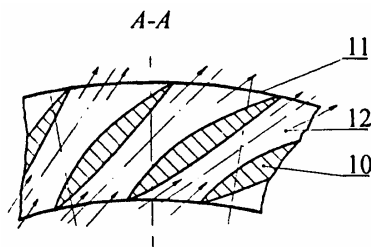
На Минской ТЭЦ-4 на энергоблоке № 5 во время планового капитального ремонта в 2000 г. была установлена система заградительного охлаждения, подобная вышеописанной, но с более простым направляющим аппаратом, имеющим закрученные лопатки. Для контроля за поведением системы заградительного охлаждения в дополнение к существующим стандартным были разработаны специальный комплект приборов, измерительной оснастки и систем контроля для измерения основных параметров двухфазных потоков и эрозионного износа входных и выходных кромок лопаток.

Система опробована на режимах пуска, на холостом ходу, на теплофикационных режимах при одно- и двухступенчатом подогревах сетевой воды в период 2001-2002 годов.

Наблюдение за работой системы заградительного охлаждения в течение года показало, что эта система, наряду с предотвращением эрозионных повреждений выходных кромок, снижает до минимума динамические напряжения в рабочих лопатках, эффективно охлаждает проточную и выхлопную части ЦНД, улучшает общую вибрационную картину турбоагрегата, повышает экономичность теплофикационных режимов турбины за счет сокращения вынужденных ранее расходов пара в конденсатор. Так, при давлении в нижнем отборе 0,06 МПа и положении поворотных диафрагм 40 мм обычно расход пара через ЦНД составляет 47,0 т/ч. При включении системы заградительного охлаждения поворотные диафрагмы могут быть полностью закрыты и протечки через них составят 3,7 т/ч, расход пара в систему охлаждения - около 6,4 т/ч. Общий расход пара через ЦНД составит 10,1 т/ч. Таким образом, снижение расхода пара в конденсатор и потерн его теплоты в холодном источнике составят, соответственно, 36,9 т/ч и 26 МВт (22,3 Гкал/ч). Это позволяет при средней за отопительный период величине удельного расхода топлива на отпуск тепловой энергии 166,94 кг/Гкал экономить 3,67 т у.т./ч или 13.300,1 т у.т. за отопительный период с ноября по март включительно при работе по тепловому графику.

Источники информации:

1. А.с. СССР 188990, МПК F 01D 25/12 // Открытия. Изобретения. - № 23. - 1966.
2. А.с. СССР 465482, МПК F 01D 25/12 // Открытия. Изобретения. - № 12. - 1975.
3. А.с. СССР 1036939, МПК F 01D 25/12 // Открытия. Изобретения. - № 31. - 1983.
4. Охлаждающие устройства ЦНД теплофикационных турбин / А.И. Алексю, К.Я. Марков, В. В. Кудрявый // Теплоэнергетика. - 1989. - № 6. - С. 67-71.
5. Исследование температурного состояния лопаточного аппарата ЦНД турбины Т-100/120-130 при работе в беспаровом режиме / В.И. Водичев, Э. Н. Ефименко и др. // Энергомашиностроение. - 1987. - № 4. - С. 8-12.
6. А.с. СССР № 1041712, МПК F 01D 25/12 // Открытия. Изобретения. - № 34. - 1983.
7. А.С. СССР № 877090, МПК F 01D 25/12 // Открытия. Изобретения. - № 40. - 1981.



Фиг. 2