

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **028485**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2017.11.30**

(51) Int. Cl. **F04D 17/08** (2006.01)  
**F04D 29/30** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201301218**

(22) Дата подачи заявки  
**2013.11.29**

---

(54) **ЦЕНТРОБЕЖНАЯ МАШИНА**

---

(31) **JP 2012-262275**

(56) **US-A-4401410**  
**KR-A-1020120014376**  
**US-A1-20100150723**  
**SU-A1-769104**

(32) **2012.11.30**

(33) **JP**

(43) **2014.06.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ХИТАЧИ, ЛТД. (JP)**

(72) Изобретатель:  
**Хирадати Кийотака, Ито Тошио,**  
**Сугимура Казуёуки, Кобайаси**  
**Хироми, Нисида Хидео (JP)**

(74) Представитель:  
**Курапов Г.П. (RU)**

---

(57) Предлагается центробежная машина, которая обеспечивает более широкий рабочий диапазон со стороны низкого расхода потока, чем у традиционного центробежного лопастного колеса, сохраняя при этом рабочий диапазон со стороны большого расхода потока на том же самом уровне, что и в традиционном центробежном лопастном колесе. Центробежная машина имеет несколько лопастей, расположенных через интервалы, заданные по периферической окружности ступицы. В случае, когда распределение углов лопасти представлено так, что по горизонтальной оси проходит линия изгиба со стороны ступицы, которая соединяет набегающий край со стороны ступицы, являющийся краем всасывающей стороны, и сбегающий край со стороны ступицы, а по вертикальной оси проходит угол лопасти со стороны ступицы, то угол лопасти со стороны ступицы становится максимальным в первом положении, которое ближе к набегающему краю со стороны ступицы, по сравнению с центральной точкой линии изгиба со стороны ступицы, и кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы является выпуклой кверху между набегающим краем со стороны ступицы и первым положением, где угол лопасти со стороны ступицы становится максимальным. В случае, когда распределение углов лопасти представлено так, что по горизонтальной оси проходит линия кривизны со стороны бандажа, которая соединяет набегающий край со стороны бандажа и сбегающий край со стороны бандажа, а по вертикальной оси проходит угол лопасти со стороны бандажа, то угол лопасти со стороны бандажа становится минимальным во втором положении, которое ближе к набегающему краю со стороны бандажа по сравнению с центральной точкой линии изгиба со стороны бандажа.

---

**B1**

**028485**

**028485**

**B1**

### Область техники

Настоящее изобретение относится к центробежной машине, имеющей центробежное лопастное колесо, в частности, к форме лопасти центробежного лопастного колеса.

#### Описание родственного уровня техники

Пример традиционной центробежной машины описан в патентном документе 1. В центробежном компрессоре, в соответствии с этой публикацией, улучшается производительность при одновременном расширении рабочего диапазона, при этом угол лопасти лопастного колеса, с целью повышения окружной скорости лопастного колеса, задается следующим образом.

А именно, угол лопасти на кривой лопастного бандажа делается минимальным по величине в окрестности набегающего края лопасти, а затем угол возрастает по мере приближения к сбегавшему краю лопасти, и угол принимает максимальное значение в промежутке между средней точкой кривой бандажа и сбегавшим краем лопасти. С другой стороны, угол лопасти на кривой лопастной ступицы увеличивается от набегающего края по направлению к сбегавшему краю, так что его максимальная величина находится между средней точкой кривой ступицы и набегающим краем.

Следует заметить, что описанное в патентном документе 2 и непатентном документе 1 относится к способам расчета лопастей, используемых в лопастном колесе центробежной машины.

#### Документы известного уровня техники

Патентные документы:

- 1) Публикация японской заявки на патент № 2010-151126 А
- 2) Японский патент № 3693121 В

Непатентный документ:

1. M. Zangeneh, A. Goto and H. Harada "On the Design Criteria for Suppression of Secondary Flows in Centrifugal and Mixed Flow Impellers," (О критерии расчета подавления вторичных потоков в лопастных колесах с центробежным и смешанным потоком), ASME Journal of Turbomachinery, vol. 120, pp. 723-735 (Oct., 1998)

#### Краткое изложение изобретения

##### Проблемы, которые должны быть решены изобретением

В центробежном компрессоре, в соответствии с патентным документом 1, угол лопасти делается таким, чтобы он имел минимальную величину в окрестности набегающего края лопасти со стороны бандажа лопастного колеса, и если смотреть на лопастное колесо в аксиальном направлении со стороны всасывания, то форма лопасти делается такой, чтобы лопасть в окрестности набегающего края со стороны бандажа была ближе к периферическому направлению. Следовательно, область горловины, которая является минимальной площадью поперечного сечения потока, проходящего между двумя смежными лопастями, в особенности уменьшается со стороны лопастного бандажа. По этой причине, скорость потока рабочего вещества в окрестности горловины возрастает, и легко может возникнуть дросселирование потока. Как только возникает дросселирование потока, то это сразу приводит к сужению рабочего диапазона центробежного компрессора со стороны большого расхода потока.

С другой стороны, как описано в патентном документе 2, если около набегающего края лопасти лопастного колеса (около выпускного отверстия лопастного колеса) сделать лопасть наклонной, так чтобы сторона ступицы предшествовала стороне бандажа в направлении вращения рабочего колеса, то, как показано в непатентном документе 2, рабочий диапазон сужается со стороны низкого расхода потока.

В настоящем изобретении предлагается центробежная машина, разработанная с позиции недостатков известного уровня техники, описанных выше. Целью изобретения является расширение рабочего диапазона центробежного лопастного колеса при низком расходе потока по сравнению с рабочим диапазоном традиционного центробежного лопастного колеса, сохраняя при этом рабочий диапазон при большом расходе потока на том же самом уровне, что и в традиционном центробежном лопастном колесе. Кроме того, целью настоящего изобретения является улучшение производительности центробежной машины, расширив подобным образом рабочий диапазон центробежного лопастного колеса.

Для достижения приведенной выше цели настоящее изобретение характеризуется тем, что центробежное лопастное колесо, имеющее несколько лопастей, которые расположены на ступице с интервалами по ее периферической окружности, смонтировано на валу вращения центробежной машины, а углы лопасти каждой из нескольких лопастей распределены таким образом, что в случае, когда распределение углов лопасти представлено так, что по горизонтальной оси проходит линия изгиба со стороны ступицы, которая соединяет набегающий край со стороны ступицы, являющийся краем всасывающей стороны, и сбегавший край со стороны ступицы, являющийся краем выпускной стороны, а по вертикальной оси проходит угол лопасти со стороны ступицы лопасти, то угол лопасти со стороны ступицы становится максимальным в первом положении, которое находится ближе к набегающему краю со стороны ступицы по сравнению с центральной точкой линии изгиба со стороны ступицы, и кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы является выпуклой кверху между набегающим краем со стороны ступицы и первым положением, где угол лопасти со стороны ступицы становится максимальным; и в случае, когда распределение углов лопасти представлено так, что по горизонтальной оси проходит линия кривизны со стороны бандажа, которая соединяет набегающий край со стороны бандажа, являющийся краем всасы-

вающей стороны со стороны бандажа на противоположной стороне ступицы, и набегающий край со стороны бандажа, являющийся краем выпускной стороны, а по горизонтальной оси проходит угол лопасти со стороны бандажа, то угол лопасти со стороны бандажа становится минимальным во втором положении, которое находится ближе к набегающему краю со стороны бандажа по сравнению с центральной точкой линии изгиба со стороны бандажа, и кривая распределения углов лопасти со стороны бандажа является выпуклой книзу на участке, который содержит набегающий край со стороны бандажа и второе положение, где угол лопасти со стороны бандажа становится минимальным; а затем кривая распределения углов лопасти со стороны бандажа становится выпуклой кверху на участке сбегающего края со стороны бандажа после упомянутого участка, где кривая распределения углов лопасти со стороны бандажа является выпуклой книзу к сбегающему краю со стороны бандажа.

В соответствии с настоящим изобретением центробежная машина обеспечивает расширение рабочего диапазона со стороны низкого расхода потока по сравнению с традиционным центробежным лопастным колесом, сохраняя при этом рабочий диапазон со стороны большого расхода потока на том же самом уровне, что и у традиционного центробежного лопастного колеса. Это определяется тем, что угол лопасти со стороны ступицы центробежного лопастного колеса, которое имеется в центробежной машине, делается таким, что принимает максимальное значение в промежутке между набегающим краем лопасти и средней точкой в направлении потока, и на кривой распределения угла лопасти не имеется точки перегиба от набегающего края лопасти до первой точки, где угол лопасти принимает максимальное значение. Кроме того, при расширении рабочего диапазона центробежного лопастного колеса обеспечивается также и повышение производительности центробежной машины.

#### **Краткое описание чертежей**

Фиг. 1 - график, иллюстрирующий распределение формы лопасти центробежного лопастного колеса в примере осуществления (первое осуществление) центробежной машины, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 2 - аксиальная проекция изображения лопасти центробежного лопастного колеса с распределением углов лопасти, показанным на фиг. 1;

фиг. 3А - изображение, которое объясняет определение формы центробежного лопастного колеса;

фиг. 3В - диаграмма, которая объясняет треугольник скоростей потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 4 - график, который объясняет распределение формы лопасти центробежного лопастного колеса в другом примере осуществления (второй пример осуществления) центробежной машины, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 5 - аксиальная проекция лопасти центробежного лопастного колеса с распределением углов лопасти, показанным на фиг. 4;

фиг. 6 - диаграмма, которая объясняет определение формы лопасти в случае аксиальной проекции центробежного лопастного колеса;

фиг. 7 - диаграмма, которая объясняет распределение формы лопасти центробежного лопастного колеса еще в одном примере осуществления (третий пример осуществления) центробежной машины, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 8А - изображение, которое показывает поток, протекающий между двумя смежными лопастями центробежного лопастного колеса;

фиг. 8В - изображение, которое показывает поток, протекающий между двумя смежными лопастями центробежного лопастного колеса;

фиг. 9А - график, который показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 9В - график, который показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 10А - диаграмма, которая показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 10В - диаграмма, которая показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 11 - график, который показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 12А - график, который показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 12В - график, который показывает один пример результатов анализа потока внутри центробежного лопастного колеса;

фиг. 13А - аксиальная проекция лопасти центробежного лопастного колеса, имеющего распределение углов лопасти, которое показано на фиг. 7;

фиг. 13В - изображение в меридиональной плоскости формы лопасти, используемой в центробежном лопастном колесе, показанной на фиг. 13А;

фиг. 14А - аксиальная проекция модификации лопасти, используемой для еще одного примера осу-

ществления центробежного лопастного колеса, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 14В - изображение в меридиональной плоскости формы лопасти, используемой в центробежном лопастном колесе, показанной на фиг. 14А;

фиг. 15 - диаграмма, которая объясняет способ изменения формы центробежного лопастного колеса, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 16А - диаграмма, показывающая результаты анализа потока внутри центробежного лопастного колеса, имеющего лопасть, которая показана на фиг. 13А;

фиг. 16В - диаграмма, показывающая результаты анализа потока внутри центробежного лопастного колеса, имеющем лопасть, которая показана на фиг. 14А;

фиг. 17 - изображение поперечного сечения в меридиональной плоскости, которое показывает часть центробежной машины, в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 18 - изображение поперечного сечения в меридиональной плоскости центробежной машины в соответствии с настоящим изобретением.

#### Описание примеров осуществления

В дальнейшем, будет дано описание нескольких примеров осуществления центробежной машины, в соответствии с настоящим изобретением, со ссылками на фигуры чертежей.

Сначала будет дано описание центробежной машины со ссылками на фиг. 17 и 18.

На фиг. 17 представлено изображение поперечного сечения в меридиональной плоскости центробежной машины 200 в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 18 представлено изображение поперечного сечения в меридиональной плоскости всей целиком центробежной машины 200, содержащей часть, которая показана на фиг. 17, и являющейся примером одноосного многокаскадного центробежного компрессора.

Центробежная машина 200 содержит центробежное лопастное колесо 170, которое передает энергию вращения на рабочее вещество, вал вращения 174, на котором смонтировано центробежное лопастное колесо 170, и диффузор 175, который находится на внешней стороне центробежного лопастного колеса 170 в радиальном направлении и преобразует динамическое давление потока рабочего вещества, вытекающего из центробежного лопастного колеса 170, в статическое давление. На нисходящей стороне диффузора 175 имеется канал нисходящего потока 178 для направления рабочего вещества к центробежному лопастному колесу 170 на последующий каскад или наружу, и обратный канал 176 для направления рабочего вещества от диффузора 175 к каналу нисходящего потока 178.

Лопастное колесо 170 содержит: диск (ступицу) 172, прикрепленную к валу вращения 174, боковую обкладку (бандаж) 173, расположенную так, что ее лицевая поверхность обращена к ступице 172, и несколько лопастей 171, расположенных между ступицей 172 и бандажом 173 и размещенных через интервалы, заданные в периферическом направлении. Заметим, что на фиг. 17 показывается случай, когда имеется бандаж 173, но используется также и лопастное колесо так называемого "полубандажного" типа, в котором бандаж отсутствует.

В диффузоре 175 используется любой из лопаточных диффузоров, имеющих несколько лопаток, которые расположены приблизительно с постоянным шагом в периферическом направлении, как показывается на фиг. 17, и безлопаточный диффузор, не имеющий лопаток, однако он не представлен на фиг. 17.

На фиг. 18 показывается многокаскадный центробежный компрессор 200, который состоит из нескольких компрессионных каскадов, представленных на фиг. 17, которые объединены в комплекс по радиальному направлению. На обоих концах вала вращения 181 расположены радиальные подшипники 187, на которых крепится с возможностью вращения вал вращения 181. На одном конце вала вращения 181 расположен упорный подшипник 188 для крепления вала вращения 181 в радиальном направлении.

На валу вращения 181 установлены и фиксируются валом 180 несколько лопастных колес 180 каскадов сжатия, в данном случае на фиг. 18 - четыре лопастных колеса 180. Со стороны нисходящего потока лопастного колеса 180 таким же самым образом, как это показано на фиг. 17, расположены диффузор 182 и обратный канал 183. Это лопастное колесо 180, а также диффузор 182 и обратный канал 183 расположены в кожухе 190. На всасывающей стороне кожуха 190 имеется кожух всасывания 184, а на стороне выпуска кожуха 190 имеется кожух выпуска 186. Со стороны восходящего потока лопастного колеса 180 первого каскада имеется направляющая лопатка 185 входного отверстия для создания предварительной закрутки в потоке всасывания. Кожух выпуска 186 содержит спиральную камеру 191.

В центробежной машине 200, сконструированной подобным образом, давление рабочего вещества, всасываемого из впускного отверстия 177 лопастного колеса, повышается каждый раз, как рабочее вещество проходит через лопастное колесо 180, а также через диффузор 182 и обратный канал 183 каждого каскада, и посылается на следующий каскад компрессии. Затем, сжатое рабочее вещество, достигнув в конечном итоге заранее заданного давления, выбрасывается в канал нисходящего потока 178.

Между тем, в центробежной машине 200, в частности, в центробежной машине с потоком рабочего вещества в виде газа, возникает такое явление, при котором из-за падения расхода потока происходит остановка течения потока в центробежном лопастном колесе 180 и в диффузоре 182, и давление уже несколько не возрастает, хотя расход потока и уменьшается, что порождает большие вариации давления и расхода потока. Это явление называется явлением помпажа, которое определяет предельную точку со

стороны низкого расхода потока центробежной машины 200. С другой стороны, при увеличении открытием клапана управления потоком или иным способом расхода потока по сравнению с предельным расходом потока при помпаже, возникает такое явление, в котором выпускное давление падает и расход потока несколько не возрастает. Это явление называется дросселированием, которое определяет предельную точку со стороны большого расхода потока центробежной машины 200. Расход потока между этими двумя предельными точками, точкой помпажа и точкой дросселирования, называется рабочим диапазоном, и на практике всегда требуется повышение рабочего диапазона без уменьшения производительности центробежной машины рабочего вещества. В дальнейшем, будет представлено несколько примеров осуществления центробежной машины 200, в соответствии с настоящим изобретением, в которых обеспечивается увеличение рабочего диапазона без снижения ее производительности.

#### Первый пример осуществления

Описание первого примера осуществления центробежной машины рабочего вещества, в соответствии с настоящим изобретением, будет дано со ссылками на фиг. 1-3. На фиг. 1 представлен график, который показывает распределение формы лопасти 20 лопастного колеса 180, используемого в центробежной машине 200. По горизонтальной оси на фиг. 1 показывается длина  $S$ , где  $S$  — длина центральной линии лопасти (линия изгиба), являющейся совокупностью точек, каждая из которых имеет равное расстояние от поверхности давления лопасти 20 и всасывающей поверхности лопасти 20, сделана безразмерной, приведенной к полной длине линии изгиба от набегающего края до сбегающего края для каждого края со стороны ступицы и каждого края со стороны бандажа. По вертикальной оси показывается угол лопасти  $\beta$  ( $^\circ$ ) (см. фиг. 2). Угол лопасти  $\beta$  на краю лопасти 20 со стороны ступицы показан пунктирной линией, а угол лопасти  $\beta$  на краю лопасти 20 со стороны бандажа показан сплошной линией.

На фиг. 2 представлено изображение аксиальной проекции единичной лопасти 20, входящей в лопастное колесо 180. Край лопасти 20 со стороны бандажа показан на кривой 24, а край лопасти 20 со стороны ступицы показан на кривой 23. Заметим, что линия изгиба используется на фиг. 20 и далее в качестве репрезентативной кривой лопасти 20. Каждый из набегающих краев 21, который является частью края с всасывающей стороны лопастного колеса 180, и каждый из сбегающих краев 22, который является частью края с выпускной стороны лопастного колеса 180, представляет собой прямую линию.

Угол лопасти  $\beta$  выражается как отклонение от периферического направления, а угол лопасти  $\beta_s$  при положении радиуса  $R$  на стороне, например, бандажа выражается отношением мгновенной длины в направлении периферической окружности  $R \cdot d\theta$  к расстоянию в меридиональной плоскости  $dm$ . Здесь расстояние в меридиональной плоскости  $dm$ , принимая, что край со стороны бандажа 24 перемещается от точки  $s_1$  к точке  $s_2$  на мгновенную длину в направлении периферической окружности  $R \cdot d\theta$  на лопасти 20, является расстоянием между точками, полученными проекцией точки  $s_1$  и точки  $s_2$  на меридиональную плоскость (плоскость  $R-Z$ ) лопастного колеса 180. Следовательно, угол лопасти  $\beta$  линии между точкой  $s_1$  и точкой  $s_2$  на линии изгиба выражается следующей формулой (1). Заметим, что  $N$  является направлением вращения, а  $O$  является началом координат на фиг. 2.

$$\beta = \tan^{-1}(dm/(R \cdot d\theta)) \dots (1)$$

На фиг. 3 представлена аксиальная проекция двух смежных лопастей А и В при некоторых положениях в радиальном направлении, где пунктирные линии представлены для случая, когда угол лопасти  $\beta$  является большим и равен  $\beta = \beta_G$ , в то время как сплошные линии представлены для случая, когда угол лопасти  $\beta$  является малым и равен  $\beta = \beta_s$ . Цифрами 31А и 31В показываются всасывающие поверхности лопастей А и В соответственно, а цифрами 32А и 32В показываются соответственно поверхности давления. Вертикальная линия, проходящая от одной лопасти А двух смежных лопастей А и В к всасывающей стороне другой лопасти В, определяется как ширина прохода между лопастями  $L$ . Ширина прохода между лопастями  $L$  равна  $L_G$  в случае, когда угол лопасти  $\beta = \beta_G$ , и равна  $L_s$  в случае, когда угол лопасти  $\beta = \beta_s$ .

На фиг. 3В представлена векторная диаграмма, которая показывает треугольник скоростей потока в лопастном колесе 180. Окружная скорость лопастного колеса 180 равна  $U$ , а когда угол лопасти  $\beta$  есть  $\beta_G$ , то относительная скорость потока в лопастном колесе 180 есть  $W$ , при этом абсолютная скорость потока в лопастном колесе есть  $C$ .

Когда угол лопасти  $\beta$  есть  $\beta_s$ , то относительная скорость потока в лопастном колесе 180 изменяется на  $W'$ , а абсолютная скорость потока в лопастном колесе 180 изменяется на  $C'$ .  $C_m$  является компонентом абсолютной скорости в меридиональном направлении и представляет собой компонент скорости, относящийся к скорости потока.

Возвращаясь к фиг. 1, здесь кривая распределения 10 углов лопасти  $\beta_s$  со стороны бандажа лопасти 20, которая показана в настоящем примере осуществления, имеет минимальное значение  $\beta_{s, \min}$  на набегающем краю лопасти  $S_{L_s}$ , и увеличивается по мере приближения к нисходящему потоку. Далее, кривая распределения углов лопасти  $\beta_s$  со стороны бандажа является выпуклой книзу в диапазоне от набегающего края лопасти  $S_{L_s}$  с длиной линии изгиба  $S_A$ , и становится выпуклой вверх в диапазоне длины линии изгиба  $S_B$ , от точки с длиной линии изгиба  $S_A$  до сбегающего края лопасти  $S_{T_s}$ . Здесь длина линии

изгиба  $S_A$  меньше по сравнению с длиной в средней точке (безразмерная длина линии изгиба  $S = 0.5$ ) в направлении потока.

С другой стороны, кривая распределения 11 углов лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы имеет максимальную величину  $\beta_{h_{max}}$  в точке между набегающим краем лопасти  $S_{L_h}$  и средней точкой  $S_m$  (безразмерная длина линии изгиба  $S = 0.5$ ) в направлении потока. Далее, кривая распределения 11 углов лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы не имеет точки перегиба между набегающим краем лопасти  $S_{L_h}$  и точкой, в которой угол лопасти составляет  $\beta_{h_{max}}$ . Причиной, по которой форма лопасти 20 была определена подобным образом, является следующее.

На фиг. 3А различие между углами лопасти  $\beta_G$  и  $\beta_S$  проявляется в виде различия в форме треугольника скоростей на фиг. 3В. Когда величина компонента скорости в меридиональном направлении  $C_m$  абсолютных скоростей  $C$  и  $C'$  на фиг. 3В задается почти идентичной при том же самом положении в радиальном направлении, то величина вектора относительной скорости  $W'$  в случае малого угла лопасти  $\beta$  равном  $\beta_S$  будет больше по сравнению с величиной вектора относительной скорости  $W$  в случае большого угла лопасти  $\beta$  равном  $\beta_G$ .

В обычном центробежном лопастном колесе 180 коэффициент замедления относительной скорости потока со стороны банджа будет больше, чем коэффициент замедления относительной скорости потока со стороны ступицы. Поэтому производительность лопастного колеса и характеристики потери скорости при срыве потока, которые определяются из таких факторов, как потери из-за трения на стенках, потери из-за замедления (потери из-за того явления, что относительная скорость потока уменьшается, когда толщина пристеночного граничного слоя возрастает к нисходящей стороне в направлении потока), или тому подобного, могут быть улучшены, если надлежащим образом задать замедление относительной скорости потока со стороны банджа.

Сделав угол лопасти  $\beta_S$  со стороны банджа минимальным на набегающем крае лопасти и распределенным выпуклостью книзу на участке длины линии кривизны  $S_A$ , может быть подавлено увеличение угла лопасти  $\beta_S$  в первой половине со стороны банджа, где коэффициент замедления относительной скорости потока является большим и лопасть 20 может легко потерять скорость, и может быть снижен коэффициент замедления относительной скорости потока. За счет этого может быть подавлена потеря скорости лопастного колеса при срыве потока далее по направлению к стороне низкого расхода потока.

Если обеспечить предотвращение замедления относительной скорости потока на части набегающего края (часть линии изгиба длиной  $S_A$ ) лопасти 20 со стороны банджа, то расширится область с высокой относительной скоростью потока от набегающего края лопасти 21 по направлению к нисходящей стороне в направлении потока. Поскольку в области, которая имеет высокую относительную скорость потока, потери из-за поверхностного трения являются большими, то увеличение области с высокой относительной скоростью потока влечет за собой уменьшение производительности лопастного колеса. Исходя из этого, кривая распределения углов лопасти  $\beta_S$  делается такой, что она является выпуклой кверху на части сбегающего края лопасти 22 (часть длины линии изгиба  $S_B$ ) со стороны банджа, и, обеспечив тем самым замедление относительной скорости потока, будет предотвращаться дальнейшее увеличение потерь на поверхностное трение на стенках.

Иными словами, на набегающем крае лопасти (часть длины линии изгиба  $S_A$ ) со стороны банджа подавляется увеличение угла лопасти  $\beta_S$  в окрестности набегающего края 21 подавляется, после этого угол лопасти  $\beta_S$  быстро возрастает, и это приводит к увеличению коэффициента замедления относительной скорости потока. То есть, в области, где подавляется увеличение угла лопасти  $\beta_S$ , относительная скорость потока становится выше, как показано на фиг. 3В, и область с такой высокой относительной скоростью расширяется до стороны нисходящего потока. В результате этого, подавляется срыв потока лопастного колеса на стороне малого расхода потока, создаваемого уменьшением относительной скорости, что позволяет повысить производительность лопастного колеса.

Попутно, в лопастном колесе настоящего примера осуществления, поскольку подавляется увеличение угла лопасти  $\beta_S$  на набегающем крае лопасти (диапазон длины линии изгиба  $S_A$ ) со стороны банджа, то ширина прохода потока между лопастями L на набегающем крае лопасти (диапазон длины линии изгиба  $S_A$ ) со стороны банджа, как показано на фиг. 3А, сужается. Что касается направления длины линии изгиба S, то ширина прохода между лопастями L делается наиболее узкой на набегающем крае лопасти 21, а затем со стороны банджа 23 делается короче, чем со стороны ступицы 24.

В проходе между лопастями, который образуется двумя смежными лопастями А и В, часть, имеющая самую узкую площадь поперечного сечения прохода по направлению длины линии изгиба S, именуется как горловина. Как только в этой горловине число Маха относительной скорости потока превысит 1, то возникнет дросселирование и дальнейшее повышение расхода потока станет невозможно. Следовательно, при работе на стороне большого расхода потока центробежной машины, где относительная скорость потока возрастает, рабочий диапазон сужается.

Для устранения этой проблемы в настоящем примере осуществления угол лопасти  $\beta_h$  со стороны банджа задается таким, чтобы он имел максимальную величину ( $\beta_{h_{max}}$ ) между набегающим краем лопасти (безразмерная длина линии изгиба  $S = 0$ ) и точкой, где безразмерная длина линии изгиба  $S = 0.5$ .

Кроме того, кривая распределения углов лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы задается такой, чтобы на ней отсутствовала точка перегиба между набегающим краем лопасти 21 и точкой, где угол лопасти  $\beta_h$  становится наибольшим.

Таким образом, угол лопасти со стороны ступицы  $\beta_h$  будет гладко и быстро повышаться между горловиной, которая в большинстве своем образуется до того, как для безразмерной длины линии изгиба будет выполняться  $S = 0.5$ , и набегающим краем лопасти 21 (безразмерная длина линии изгиба  $S = 0$ ). В результате этого, угол лопасти  $\beta_{h\_throat}$  со стороны ступицы на горловине увеличивается, что дает в результате увеличенную ширину прохода  $L_h$  между лопастями в окрестности со стороны ступицы на горловине. Поскольку ширина прохода между лопастями  $L_h$  в окрестности со стороны ступицы увеличивается, то может сохраняться площадь горловины, даже если ширина прохода  $L_s$  между лопастями со стороны бандажа сужается. Увеличение ширины прохода  $L_h$  между лопастями со стороны ступицы определяется тем фактом, что кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы не имеет точки перегиба и является выпуклой вверх. В результате этого, становится возможным расширение диапазона расхода потока, когда число Маха относительной скорости потока превышает 1, в сторону большого расхода потока, подавляется возникновение дросселирования в лопастном колесе 180, и можно сохранить рабочий диапазон на стороне высокого расхода потока центробежной машины.

Следует заметить, что для повышения угла лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы на горловине максимальная величина  $\beta_{h\_max}$  угла лопасти со стороны ступицы делается настолько более близкой к  $90^\circ$ , к тому значению, при котором не возникает срыва потока со стороны ступицы на лопасти 20. Сделав максимальную величину  $\beta_{h\_max}$  угла лопасти со стороны ступицы близкой к  $90^\circ$ , максимальная величина  $\beta_{h\_max}$  угла лопасти со стороны ступицы часто становится больше, чем угол лопасти  $\beta_{h\_T}$  на выходном отверстии со стороны ступицы. По этой причине, желательно гладко уменьшать кривую распределения углов лопасти  $\beta_h$  от точки, где со стороны ступицы угол лопасти принимает максимальное значение  $\beta_{h\_max}$ , до выпускного отверстия со стороны ступицы.

Кроме того, желательно делать диаметр  $R_{h\_L}$  набегающего края лопасти со стороны ступицы меньше, чем диаметр  $R_{s\_L}$  набегающего края лопасти со стороны бандажа. Это делается по следующей причине.

Поскольку в центробежном лопастном колесе радиус кривизны  $\rho_s$  со стороны бандажа в меридиональной плоскости меньше, чем радиус кривизны  $\rho_h$  со стороны ступицы (см. фиг. 17), то компонент скорости потока в меридиональном направлении на набегающем крае 21 лопасти будет больше со стороны бандажа и меньше со стороны ступицы. Потому, если диаметр  $R_{h\_L}$  набегающего края лопасти со стороны ступицы делается приблизительно равным диаметру  $R_{s\_L}$  набегающего края лопасти со стороны бандажа, то окружная скорость  $U$  лопастного колеса на набегающем крае 21 лопасти со стороны ступицы становится чрезмерной. Кроме того, поскольку на набегающем крае лопасти 21 ступицы скорость потока в направлении меридиональной плоскости небольшая, то рабочее вещество, которое поступает на набегающий край лопасти 21 со стороны ступицы, проходит на набегающий край лопасти 21 со стороны ступицы с направления, несколько наклоненного в периферическом направлении.

С другой стороны, для снижения потери давления, которое происходит на набегающем крае лопасти 21, предпочтительно делать относительный угол входящего потока, который поступает на набегающий край лопасти 21, и угол лопасти  $\beta$  на набегающем крае лопасти 21 равными (состояние отсутствия угла атаки). Если диаметр  $R_{h\_L}$  набегающего края лопасти 21 со стороны ступицы и диаметр  $R_{s\_L}$  набегающего края лопасти 21 со стороны бандажа являются равными, то идеальным вариантом является сделать равными между собой угол лопасти  $\beta$  на набегающем крае лопасти 21 со стороны ступицы и этот же угол со стороны бандажа. Из фиг. 1 следует, что было бы необходимым уменьшить угол лопасти  $R_{h\_L}$  на набегающем крае лопасти 21 со стороны ступицы вплоть до угла лопасти  $R_{s\_L} = \beta_{s\_min}$  на набегающем крае лопасти 21 со стороны бандажа. В результате, угол лопасти  $\beta$  резко увеличивается от набегающего края лопасти 21, приводя к чрезмерно увеличенной величине угла лопасти  $\beta$ , и тогда существует возможность того, что поток не пойдет вдоль лопасти 20 и произойдет срыв потока, что приведет в результате к ухудшению производительности. Для устранения этой проблемы предпочтительно делать диаметр  $R_{h\_L}$  набегающего края лопасти со стороны ступицы меньше, чем диаметр  $R_{s\_L}$  набегающего края лопасти со стороны бандажа.

### Второй пример осуществления

Описание другого примера осуществления центробежной машины 200 в соответствии с настоящим изобретением будет дано со ссылками на фиг. 4-6. Настоящий пример осуществления отличается от центробежной машины, представленной выше в качестве первого примера осуществления, тем, что в центробежном лопастном колесе 180, содержащем лопасти, изменяется положение минимального значения на кривой распределения углов лопасти со стороны бандажа.

На фиг. 4 показывается пример распределения углов лопасти центробежного лопастного колеса 180 в соответствии с настоящим изобретением. Кривая распределения угла лопасти со стороны ступицы 41 аналогична распределению первого примера осуществления. Отличием является то, что кривая распределения углов лопасти 40 со стороны бандажа сначала уменьшается при движении от набегающего края

лопасти  $S_{L_s}$  по направлению к нисходящей стороне в направлении потока, затем принимает минимальное значение  $\beta_{s_{\min}}$ , и после этого снова начинает возрастать. Кроме того, кривая распределения углов лопасти между набегающим краем лопасти со стороны бандажа  $S_{L_s}$  и сбегающим краем лопасти со стороны бандажа  $S_{T_s}$  сначала имеет выпуклую книзу форму в направлении линии изгиба, и выпуклую вверх форму по направлению к концу. Кривая распределения на фиг. 4 имеет выпуклую книзу форму на участке  $S_C$ , который расположен по восходящему потоку от средней точки  $S_m$  (длина линии изгиба  $S = 0.5$ ), и выпуклую вверх форму на участке  $S_D$ , который следует за участком  $S_C$ , но участок  $S_C$  с выпуклой книзу формой может проходить за средней точкой  $S_m$ .

Центробежное лопастное колесо 180 настоящего примера осуществления дополнительно понижает коэффициент замедления относительной скорости около набегающего края со стороны бандажа лопастного колеса 180 по сравнению с центробежным лопастным колесом 180, показанным ранее в первом примере осуществления. Таким образом, рабочий диапазон лопастного колеса может быть еще более расширен со стороны низкого расхода потока. Заметим, что ширина прохода между лопастями  $L$  меньше, чем у лопастного колеса, показанном в первом примере осуществления, на горловине со стороны бандажа. Затем в настоящем примере осуществления для сохранения рабочего диапазона со стороны большого расхода потока центробежного лопастного колеса 180, максимальный угол лопасти со стороны ступицы  $\beta_{h_{\max}}$  задается по величине равным или большим, чем величина угла в первом примере осуществления. Кроме того, поскольку максимальный угол лопасти со стороны ступицы  $\beta_{h_{\max}}$  часто становится больше, чем угол лопасти со стороны ступицы  $\beta_{T_h}$  на выпускном отверстии, то кривая распределения углов лопасти между положением максимального угла лопасти со стороны ступицы  $\beta_{h_{\max}}$  и выпускным отверстием со стороны ступицы  $S_{T_h}$ , гладко возрастает.

На фиг. 5 представлена аксиальная проекция только одной лопасти 50 из центробежного лопастного колеса, имеющей распределение углов лопасти, показанное на фиг. 4. Линия изгиба со стороны бандажа 54 лопасти 50 проявляет, в основном, S-образную форму, имеющую участок A5A, где сторона набегающего края лопасти 51 имеет выпуклую наружу в радиальном направлении форму. С другой стороны, линия изгиба со стороны ступицы 53 лопасти 50 проявляет, в основном, S-образную форму, имеющую участок A5B, где сторона набегающего края лопасти 51 имеет выпуклую внутрь в радиальном направлении форму. Причина этого обстоятельства будет описана совместно с фиг. 6.

На фиг. 6 представлена диаграмма системы координат центробежного лопастного колеса 180 в аксиальной проекции. Фиг. 6 является изображением, представленным с всасывающей стороны. Центробежное лопастное колесо 180 вращается в направлении вращения  $N$  с центром на оси  $O$ . Для облегчения описания работы лопасти центробежного лопастного колеса 180 это описание будет дано для лопасти 60, чья кривая изгиба является прямой линией.

Если принять, что угол лопасти на набегающем крае лопасти 61 есть  $\beta_L$ , то это изображение показывает угол лопасти  $\beta$  в положении P62 на стороне нисходящего потока от набегающего края лопасти 61. Положение P62 отстоит от набегающего края лопасти 61 на  $\Delta\theta$  в периферическом направлении, а угол лопасти  $\beta$  в этом положении P62, как следует из геометрического соотношения, выражается в виде  $\beta = \beta_L + \Delta\theta$ . В случае лопасти, линия изгиба которой представляет собой прямую линию, угол лопасти  $\beta$  линейно возрастает относительно угла  $\theta$  в периферическом направлении, по мере его прохождения по нисходящему потоку от набегающего края лопасти 61.

Будем рассматривать случай, когда угол лопасти  $\beta$  не меняется линейно в периферическом направлении относительно угла  $\theta$  линии изгиба лопасти, но если рассматривать угол по нисходящему потоку от положения P62, то величина приращения угла лопасти  $\beta$  становится меньше, или величина приращения угла лопасти  $\beta$  становится больше. Когда величина приращения угла лопасти  $\beta$  становится меньше за положением P62 относительно периферического направления угла  $\theta$  линии изгиба, то форма линии изгиба становится подобна кривой 63 на фиг. 6. То есть, при соприкосновении с прямой линией изгиба, которая проходит через положение P62, линия изгиба становится выпуклой наружу в радиальном направлении. В отличие от этого, когда величина приращения угла лопасти  $\beta$  быстро становится больше за положением P62 относительно периферического направления угла  $\theta$  линии изгиба, то форма линии изгиба становится подобна кривой 64 на фиг. 6. То есть, при соприкосновении с прямой линией изгиба, которая проходит через положение P62, линия изгиба становится выпуклой внутрь в радиальном направлении.

В центробежном лопастном колесе 180, имеющем распределение углов лопасти, показанное на фиг. 4, поскольку угол лопасти со стороны бандажа быстро уменьшается по мере направления от набегающего края лопасти к ниспадающему потоку и становится минимальным, а затем снова начинает возрастать, то кривая распределения углов лопасти имеет, как показано на фиг. 5, приблизительно S-образную форму, где набегающий край лопасти 51 имеет выпуклую наружу форму в радиальном направлении. Кроме того, поскольку угол лопасти со стороны ступицы становится максимальным между набегающим краем 51 и средней точкой в направлении потока, причем без наличия точки перегиба, а затем гладко уменьшается вниз по потоку от положения с максимальным значением, то линия изгиба со стороны ступицы принимает приблизительно S-образную форму, где сторона набегающего края лопасти 51 имеет выпуклую вниз форму в радиальном направлении.

Также в настоящем примере осуществления по той же самой причине, что и в первом примере осуществления, желательно делать диаметр набегающего края лопасти со стороны ступицы меньше, чем диаметр набегающего края лопасти со стороны бандажа.

### Третий пример осуществления

Описание еще одного примера осуществления центробежной машины 200, в соответствии с настоящим изобретением, будет дано со ссылками на фиг. 7 и последующие. Настоящий пример осуществления отличается от центробежной машины 200, представленной ранее в качестве первого и второго примеров осуществления, в том, что лопасть 70 со стороны сбегающего края лопасти 72 центробежного лопастного колеса 180 наклонена назад относительно направления вращения. Таким образом, в аксиальной проекции центробежного лопастного колеса 180 линия изгиба лопасти со стороны бандажа и линия изгиба лопасти со стороны ступицы пересекаются.

На фиг. 7 представлено изображение аксиальной проекции единичной лопасти 70, входящей в центробежное лопастное колесо 180. На сбегающем крае лопасти 72 линия изгиба 74 со стороны бандажа наклонена в противоположную сторону от линии изгиба 73 со стороны ступицы относительно направления вращения. Заметим, что распределение лопастных углов линии изгиба 73 со стороны ступицы и линии изгиба 74 со стороны бандажа является подобным распределению в первом и втором примерах осуществления.

Далее будет дано описание работы центробежного лопастного колеса 180, в соответствии с настоящим примером осуществления.

На фиг. 8А представлено изображение, иллюстрирующее центробежное лопастное колесо 180 (в дальнейшем именуемое как "лопастное колесо с наклоном вперед"), в котором линия изгиба со стороны бандажа 83 на сбегающем крае лопасти 86 наклонена несколько более вперед по сравнению с линией изгиба со стороны ступицы 84, в частности, представлено изображение двух смежных лопастей 80, которые образуют проход между лопастями. На сбегающем крае лопасти 86 лопасти 80 сторона бандажа 83 наклонена вперед по направлению вращения относительно ступицы 84.

Когда подобным образом на сбегающем крае лопасти 86 создается наклон вперед по направлению вращения стороны бандажа 83 лопасти 80 относительно стороны ступицы 84, становится возможным снижение механических напряжений из-за центробежных сил, которые действуют на лопасть 80. Сила на лопасти  $F$ , действующая на рабочее вещество со стороны каждой лопасти 80, действует в вертикальном направлении относительно поверхности давления лопасти 81, иными словами, по направлению к стороне ступицы 84 на всасывающей поверхности лопасти 82. Поскольку статическое давление увеличивается в том направлении, в котором действует на лопасть сила  $F$ , то увеличивается статическое давление на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны ступицы 84. В отличие от этого на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83 статическое давление уменьшается.

В проходе между лопастями центробежного лопастного колеса 180 около поверхности стенок возникает пристеночный пограничный слой, где скорость потока медленнее и энергия потока ниже, чем в основном потоке. Рабочее вещество в пристеночном пограничном слое не может преодолеть градиент статического давления в поперечном сечении прохода между лопастями, и проходит из области высокого статического давления к области низкого статического давления. Здесь, поперечное сечение прохода между лопастями является поперечным сечением, полученным разрезом прохода между лопастями вдоль цилиндрической поверхности, имеющей радиус  $r$  = константе от центра вала вращения. Упомянутый проходящий поток создает внутри поперечного сечения прохода между лопастями вторичный поток, который имеет компоненту скорости, перпендикулярную к скорости основного потока.

Как описано выше, около пристеночного пограничного слоя в поперечном сечении прохода между лопастями центробежного лопастного колеса 180 образуется вторичный поток, который протекает от поверхности давления лопасти 81, где статическое давление является высоким, по направлению к всасывающей поверхности лопасти 82, где статическое давление является низким. В лопастном колесе с наклоном вперед вторичный поток, который протекает со стороны ступицы 84 по направлению к стороне бандажа 83, также образуется около пристеночного пограничного слоя на всасывающей поверхности лопасти 82. Таким образом, на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83 аккумулируется низкоэнергетический поток, что приводит к повышению потери давления. Наряду с этим нарушается однородность потока в поперечном сечении прохода между лопастями и увеличиваются потери на стороне нисходящего потока лопастного колеса 180, как например, на диффузоре и обратном канале.

На фиг. 8В представлено изображение, иллюстрирующее центробежное лопастное колесо 180 (в дальнейшем именуемое как "лопастное колесо с наклоном назад"), в котором линия изгиба со стороны бандажа 83 на сбегающем крае лопасти 86 наклонена несколько более назад по сравнению с линией изгиба со стороны ступицы 84, в частности, представлено изображение двух смежных лопастей 80, которые образуют проход между лопастями. В лопастном колесе с наклоном назад сила  $F$  действует на всасывающую поверхность лопасти 82 по направлению к стороне бандажа 83. Поэтому статическое давление на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны ступицы 84 уменьшается, в то время как статическое давление на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83 увеличивается. Это обеспечивает возможность подавления вторичного потока по направлению к всасывающей поверхности

82 со стороны бандажа 83, улучшая однородность потока в поперечном сечении прохода между лопастями, что таким образом повышает производительность центробежного лопастного колеса 180.

На фиг. 9А представлены графики, показывающие сравнение теоретических характеристик давления лопастного колеса с наклоном вперед и лопастного колеса с наклоном назад, полученные расчетом трехмерного вязкого рабочего вещества.

На фиг. 9В представлены графики, показывающие сравнение теоретических характеристик производительности лопастного колеса с наклоном вперед и лопастного колеса с наклоном назад, полученные расчетом трехмерного вязкого рабочего вещества, характеристики давления которых были показаны на фиг. 9А. Лопастное колесо с наклоном вперед и лопастное колесо с наклоном назад, представленные на этих чертежах, имеют распределение углов лопастей, аналогичное тому, что имеется у лопастного колеса, раскрытого в патентном документе 1 известного уровня техники и являющегося, так сказать, традиционным лопастным колесом. Тонкая линия 91 относится к лопастному колесу с наклоном вперед, а жирная линия 92 относится к лопастному колесу с наклоном назад.

Лопастное колесо с наклоном вперед и лопастное колесо с наклоном назад имеют одинаковое распределение углов лопасти  $\beta$  и различаются одно от другого только направлением наклона сбегающего края лопасти 86. Трехмерный анализ вязкого рабочего вещества был проведен для однокаскадных центробежных машин, которые являются двумя типами центробежных лопастных колес 180, описанных выше, скомбинированных с безлопастным диффузором и обратным каналом, имеющими одинаковые формы. По горизонтальной оси представлен коэффициент расхода потока, нормализованный относительно расхода потока в расчетной точке лопастного колеса с наклоном вперед. По вертикальным осям представлены коэффициент давления и коэффициент производительности, соответственно нормализованные относительно давления в расчетной точке и производительности в расчетной точке лопастного колеса с наклоном вперед. Установлено, что в лопастном колесе с наклоном назад улучшается как давление вблизи расчетной точки, так и производительность вблизи расчетной точки, по сравнению с лопастным колесом с наклоном вперед.

На фиг. 10А представлена диаграмма, иллюстрирующая пример распределения скорости потока в расчетной точке лопастного колеса с наклоном вперед. Она показывает растяжение цилиндрической поверхности, содержащей сбегающий край лопасти 102 лопастного колеса, и является распределением безразмерной радиальной скорости  $C_r/U_2$ , полученной нормализацией распределения радиальной скорости потока  $C_r$  окружной скоростью на выходном отверстии лопастного колеса  $U_2$ . Диаграмма показывает проход между лопастями двух смежных лопастей.

На фиг. 10В представлена диаграмма, иллюстрирующая пример распределения скорости потока в расчетной точке лопастного колеса с наклоном назад. Она соответствует фиг. 10А.

В лопастном колесе с наклоном вперед, как показывается на фиг. 10А, область низкой скорости (зачерненная часть) является явно выраженной около всасывающей поверхности лопасти 104 со стороны бандажа 101, в то время как в лопастном колесе с наклоном назад, как показывается на фиг. 10В, область низкой скорости уменьшена. С другой стороны, как показывается на фиг. 9А, срыв потока, то есть, резкое уменьшение характеристики роста давления, наблюдалось в лопастном колесе с наклоном назад при более высоком расходе потока, чем в лопастном колесе с наклоном вперед. Из анализа результатов было установлено, что причиной более раннего срыва потока в каскаде центробежного компрессора, имеющего лопастное колесо с наклоном назад, является более ранний срыв потока в лопастном колесе с наклоном назад.

Та причина, по которой срыв потока возникает более рано в лопастном колесе с наклоном назад, будет объяснена со ссылкой на фиг. 11.

На фиг. 11 представлен график, показывающий распределение безразмерных относительных скоростей  $W/U_2$  около поверхности лопасти со стороны бандажа лопастного колеса с наклоном вперед, базирясь на результатах анализа в расчетной точке. По горизонтальной оси на фиг. 11 представлена безразмерная длина линии изгиба  $S$  при набегающем крае лопасти 85 на самом левом конце и набегающем крае лопасти 86 на самом правом конце. Пунктирные линии 112 и 113 относятся к лопастному колесу с наклоном вперед, а сплошные линии 110 и 111 относятся к лопастному колесу с наклоном назад. Линии 110 и 112 показывают относительные скорости потока на поверхности всасывания 82, а линии 111 и 113 показывают относительные скорости потока на поверхности давления.

Поскольку в лопастном колесе с наклоном назад сторона бандажа наклонена назад в направлении вращения относительно стороны ступицы на сбегающем крае лопасти 86 центробежного лопастного колеса 180 (см. фиг. 8В), то статическое давление уменьшается на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны ступицы 84, и статическое давление увеличивается на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83. Поэтому рост статического давления в направлении потока от набегающего края лопасти 85 по направлению к сбегающему краю лопасти 86 возрастает на всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83. Увеличение роста статического давления в направлении потока приводит к увеличению коэффициента замедления относительной скорости в направлении потока. В лопастном колесе в наклоне назад, особенно на первой половине всасывающей поверхности лопасти 82 со стороны бандажа 83, где легко происходит срыв потока на лопасти 80, коэффициент замедления относи-

тельной скорости увеличивается от набегающего края лопасти 85 (см. сплошную линию 110 на фиг. 11). То есть, относительная скорость 110 на всасывающей поверхности лопасти в лопастном колесе с наклоном назад уменьшается на первой половине лопасти 80 больше, чем уменьшается относительная скорость 112 на всасывающей поверхности лопасти в лопастном колесе с наклоном вперед.

Из-за статического давления, которое увеличивается от набегающего края лопасти 85 по направлению к сбегавшему краю лопасти 86, возникает положительный градиент давления, однако если около поверхности лопасти 80 относительная скорость резко уменьшается, то энергия, которая необходима для преодоления этого положительного градиента давления и прохождения нисходящего потока, становится недостаточной. В результате, на всасывающей поверхности 82 лопасти 80 со стороны бандажа 83 на поверхности лопасти легко возникает отстойка потока на поверхности лопасти в первой ее половине около набегающего края лопасти 85, и на стороне более высокого расхода потока происходит потеря скорости лопастного колеса из-за срыва потока, что находится на границе помпажа. Следовательно, в лопастном колесе с наклоном назад, как показывается на фиг. 10В, несмотря даже на то, что подавляется аккумулятивное низкоэнергетического рабочего вещества на всасывающей поверхности 104 лопасти со стороны бандажа 101, ускоряется потеря скорости лопастного колеса из-за срыва потока. Следует заметить, что в общем случае низкоэнергетический поток аккумулируется за счет вторичного потока, что приводит к срыву потока на поверхности лопасти в большом диапазоне.

Исходя из этих проблем предыдущего уровня техники, в настоящем примере осуществления принимается распределение углов лопасти  $\beta$  таким, какое описано в первом примере осуществления или во втором примере осуществления. Иными словами, угол лопасти  $\beta_s$  делается минимальным на набегающем крае лопасти 21 со стороны бандажа 24, а затем этот угол увеличивается. Кроме того, угол лопасти  $\beta_s$  между набегающим краем лопасти 21 и сбегавшим краем лопасти 22 со стороны бандажа 24 имеет распределение выпуклостью книзу со стороны набегающего края лопасти 21 и выпуклостью кверху со стороны сбегавшего края лопасти 22. Кроме того, положение максимального угла  $\beta_{h\_max}$  со стороны ступицы находится на первой половине лопасти от набегающего края лопасти 21 в направлении по потоку, и предотвращается возникновение точки перегиба на кривой распределения углов лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы 23 от набегающего края лопасти 21 к положению максимального угла лопасти  $\beta_{h\_max}$  (см. фиг. 1 и 2).

В альтернативном варианте угол лопасти  $\beta_s$  со стороны бандажа 24 сначала уменьшается, чтобы он стал минимальным углом лопасти  $\beta_{s\_min}$ , а после этого увеличивается. Кроме этого, угол лопасти  $\beta_s$  между набегающим краем лопасти 51 и сбегавшим краем лопасти 52 со стороны бандажа 54 имеет распределение выпуклое книзу со стороны набегающего края лопасти 51, и выпуклое кверху - со стороны сбегавшего края лопасти 52. Положение максимального угла лопасти  $\beta_{h\_max}$  со стороны ступицы 53 располагается между набегающим краем лопасти 51 и средней точкой лопасти в направлении потока, и предотвращается возникновение точки перегиба на кривой распределения углов лопасти  $\beta_h$  со стороны ступицы 53 на стороне восходящего потока от положения максимального угла лопасти  $\beta_{h\_max}$  (см. фиг. 4 и 5).

Применением одного из распределений углов лопасти, описанных выше, может быть предотвращено резкое замедление относительной скорости на всасывающей поверхности лопасти со стороны бандажа, когда сторона бандажа наклонена назад в радиальном направлении по сравнению со стороной ступицы на сбегавшем крае лопасти для подавления аккумуляции низкоэнергетического рабочего вещества по направлению к углу между всасывающей поверхностью лопасти и стенкой бандажа. Кроме того, может быть также сохранен рабочий диапазон на стороне низкого расхода потока и на том же самом уровне, что и в традиционном лопастном колесе, может быть также сохранен рабочий диапазон на стороне высокого расхода потока, что и в традиционном лопастном колесе. Таким образом, возможно получение центробежной машины, которая достигает более высокой производительности и имеет в тоже время более широкий рабочий диапазон.

Как было описано выше, в настоящем примере осуществления может применяться распределение угла лопасти как первого, так и второго примеров осуществления. Однако когда требуется очень высокая производительность центробежной машины, то необходимо повысить степень наклона со стороны бандажа назад, в направлении вращения на сбегавшем крае лопасти, по сравнению с наклоном со стороны ступицы. В таких случаях для сохранения рабочего диапазона со стороны низкого расхода потока необходимо значительно уменьшить коэффициент замедления относительной скорости потока на первой половине всасывающей поверхности, которая является поверхностью лопасти со стороны бандажа, затем предпочтительно применить распределение углов лопасти  $\rho$ , описанное во втором примере осуществления, поскольку оно предоставляет больше возможностей по уменьшению коэффициента замедления относительной скорости потока, чем у первого примера осуществления.

На фиг. 12А показывается характеристика давления лопастного колеса с наклоном назад (далее именуется также как модифицированное лопастное колесо с наклоном назад), который имеет распределение углов лопасти  $\beta$ , описанное во втором примере осуществления, и характеристика традиционного лопастного колеса с наклоном вперед, описанного выше. Тонкая линия 121 является той же самой, что и

тонкая линия 91, показанная на фиг. 9А, а толстая линия 122 дана для модифицированного лопастного колеса с наклоном назад.

На фиг. 12В представлен график, показывающий характеристики производительности лопастных колес, для которых на фиг. 12А были показаны характеристики давления. Тонкая линия 123 является той же самой, что и тонкая линия 93 на фиг. 9В, а толстая линия 124 является кривой производительности для модифицированного лопастного колеса с наклоном назад. Графики как фиг. 12А, так и фиг. 12В получены из трехмерного анализа вязкого рабочего вещества на однокаскадных центробежных машинах, каждая из которых имеет безлопаточный диффузор и обратный канал, соответственно одинаковой формы, при этом каждая центробежная машина скомбинирована с модифицированным лопастным колесом с наклоном назад и лопастным колесом с наклоном вперед. В модифицированном лопастном колесе с наклоном назад улучшены, по сравнению с лопастным колесом с наклоном вперед, как давление, так и производительность в окрестности расчетной точки. Кроме того, как рабочий диапазон на стороне низкого потока, так и рабочий диапазон на стороне высокого потока могут быть сохранены в модифицированном лопастном колесе с наклоном назад, в основном, на том же самом уровне, что и в традиционном лопастном колесе с наклоном вперед.

Кстати, в каждом примере осуществления, описанном выше, форма лопастей 20, 50, имеющихся в центробежном лопастном колесе 180, определяются в центробежном лопастном колесе 180 с использованием формы лопасти на краю со стороны ступицы и на краю со стороны бандажа. Для получения центробежного лопастного колеса с высокой производительностью важное значение имеет трехмерная форма лопасти. Для этого форму лопасти, определяемой краем со стороны ступицы и краем со стороны бандажа, нужно будет делать трехмерной надлежащим соединением между краем со стороны ступицы и краем со стороны бандажа.

Ниже будет дано описание некоторых примеров способа соединения между краем со стороны ступицы и краем со стороны бандажа, со ссылками на фигуры чертежей.

На фиг. 13А представлено изображение аксиальной проекции лопасти 130, которая имеет прямолинейные элементы и используется в центробежном лопастном колесе 180. На фиг. 13В представлено изображение меридиональной проекции центробежного лопастного колеса, имеющего лопасть 130, показанную на фиг. 13А. Пунктирная линия 136 показывает пример меридиональной линии потока. Кроме того, Ах показывает центральную линию оси вращения. Линия изгиба со стороны ступицы 133 и линия изгиба 134 со стороны бандажа разделены несколькими точками  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$  ( $i = 0, \dots, n$ ;  $n =$  полное число точек деления), соответственно, от набегающего края лопасти 131 и сбегающему краю лопасти 132, где каждая пара точек деления  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$  соединена между собой прямыми линиями. Соединительный элемент 135, который соединяет между собой точки деления  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$ , представляет собой прямолинейный элемент.

Поскольку лопасть 130 центробежного лопастного колеса 180 определяется совокупностью прямолинейных элементов 135, то становится возможна машинная обработка режущим инструментом, таким как концевая фреза, когда центробежное лопастное колесо изготавливается с использованием 5-осевого станка с числовым программным управлением. Установкой торца концевой фрезы на первом прямолинейном элементе 135 и затем плавным перемещением режущего инструмента вдоль линии изгиба со стороны ступицы 133 и линии изгиба со стороны бандажа 134 от набегающего края лопасти 131 к сбегающему краю лопасти 132, машинной обработкой с числовым управлением может быть изготовлена трехмерная форма лопасти, что повысит производительность.

Со ссылками на фиг. 14А и 14В будет дано описание другого примера способа соединения между линией изгиба со стороны ступицы 143 и линией изгиба со стороны бандажа 144.

На фиг. 14А представлено изображение аксиальной проекции лопасти 140, которая используется в центробежном лопастном колесе 180 и состоит из криволинейных элементов 145. На фиг. 14В представлено изображение меридиональной проекции поперечного сечения центробежного лопастного колеса, имеющего лопасть 140, показанную на фиг. 14А. Пунктирная линия 146 показывает пример меридиональной линии потока. В отличие от лопастного колеса 180, показанного на фиг. 13А и 13В, лопасть 140 определяется совокупностью криволинейных элементов 145. Как и в случае с прямолинейными элементами, линия изгиба со стороны ступицы 143 и линия изгиба 144 со стороны бандажа разделены несколькими точками  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$  ( $i = 0, \dots, m$ ;  $m =$  полное число точек деления), соответственно, от набегающего края лопасти 141 и сбегающему краю лопасти 142, где каждая пара точек деления  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$  соединена между собой искривленной линией. Соединительный элемент 145, который соединяет между собой точки деления  $\Phi_i$  и  $\Psi_i$ , представляет собой криволинейный элемент.

Далее будет дано описание нескольких специальных примеров кривой соединения между линией изгиба со стороны ступицы 143 и линией изгиба со стороны бандажа 144.

Сначала будет дано описание способа получения криволинейного элемента модифицированием линейного элемента. В лопастном колесе 180, имеющем лопасть 130 из прямолинейных элементов, как было описано на фиг. 13В, поверхность вращения потока получается вращением меридиональной линии потока 136, образованной между линией изгиба со стороны бандажа 134 и линией изгиба со стороны ступицы 133 вокруг оси вращения Ах лопастного колеса 180.

На фиг. 15 представлена диаграмма, показывающая трехмерное перспективное изображение поверхности вращения потока 150. Новый участок лопасти 155 получается образованием подобного расширения или подобного сокращения (сокращение на  $R_d$  в настоящем примере осуществления) участка лопасти 151 в направлении хорды 154, которая соединяет набегающий край лопасти 152А и сбегающий край лопасти 153 на участке лопасти 151, который образован на поверхности вращения потока 150. Участок лопасти 155 настоящего примера осуществления образован фиксацией сбегающего края лопасти 153, перемещением набегающего края лопасти 152А к набегающему краю лопасти 152 и перемещением диаметра набегающего края лопасти 156А к диаметру набегающего края лопасти 156В.

Разделением нескольких прямолинейных элементов 135, показанных на фиг. 13В, в направлении высоты лопасти несколькими линиями потока, которые образованы между линией изгиба со стороны банджа 134 и линией изгиба со стороны ступицы 133, тем же самым образом образуются поверхности вращения потока 150. Новый участок лопасти 155 получается образованием подобного расширения или подобного сокращения полученного участка лопасти 151 в направлении по хорде. Эта процедура повторяется для получения нескольких новых участков лопасти 155, которые затем располагаются слоями в направлении высоты лопасти.

Работа (теоретический рост давления) лопастного колеса 180 обеспечивается не движением диаметра сбегающего края лопасти 157 (не показано) и не изменением распределения углов лопасти  $\beta$  относительно безразмерной длины линии изгиба  $S$ . При слоистой структуре величина подобного расширения или величина подобного сокращения изменяется на каждом участке высоты лопасти, и соответственно полученные поперечные сечения лопасти укладываются слоями в направлении по высоте лопасти. Таким образом, образуется лопасть, построенная из криволинейных элементов.

Было установлено, что в центробежном лопастном колесе, в котором форма набегающего края лопасти образована из криволинейных элементов так, что она становится криволинейной в меридиональной плоскости, площадь горловины увеличивается, в частности, в том случае, когда на меридиональной плоскости, которая показана на фиг. 14В, набегающий край лопасти 146 становится выпуклым в направлении впускного отверстия. Исходя из этого, при использовании лопасти, выполненной из криволинейных элементов, показанных на фиг. 14А и 14В, возможно дальнейшее улучшение рабочего диапазона со стороны большого расхода потока.

В другом примере образования лопасти из криволинейных элементов требуется получение нескольких поверхностей вращения потока в направлении по высоте лопасти, которые образуются вращением меридиональной линии потока вокруг оси вращения, и последующим образованием нового участка лопасти скользящим перемещением участка лопасти по каждой поверхности вращения потока по направлению к периферической окружности для наложения один к другому соответствующих участков лопасти после скользящего перемещения в направлении по высоте лопасти. Образовав подобным образом лопасть с криволинейными элементами, можно обеспечить то, что поток из выходного отверстия лопастного колеса будет более однородным, чем в случае лопасти с прямолинейными элементами, в которой сторона банджа, по сравнению со стороной ступицы, просто наклонена назад в направлении вращения на сбегающем крае лопастного колеса.

На фиг. 16А представлена диаграмма, показывающая распределение безразмерных радиальных скоростей  $C_r/U_2$  на выходном отверстии лопастного колеса с лопастями из прямолинейных элементов.

На фиг. 16В представлена диаграмма, показывающая распределение безразмерных радиальных скоростей  $C_r/U_2$  на выходном отверстии лопастного колеса с лопастями из криволинейных элементов.

В лопастном колесе, показанном на фиг. 16В, величина скольжения участка лопасти по направлению к периферической окружности регулируется для каждого положения по высоте лопасти так, что всасывающая поверхность лопасти 164 имеет выпуклую форму относительно направления вращения. Оба рисунка получены в результате трехмерного анализа вязкости в точке спецификации. Области низкой скорости (зачерненные области) появляются в случае лопасти с линейными элементами, показанной на фиг. 16А, около ступицы 160 на всасывающей стороне лопасти, но такие области исчезают в случае лопасти с криволинейными элементами, показанной на фиг. 16В.

В соответствии с настоящим примером осуществления при изготовлении лопастных колес возможны различные способы соединения краев лопасти со стороны ступицы и краев со стороны банджа, что обеспечивает возможность дальнейшего расширения области горловины и тонкое регулирование вторичного потока.

В соответствии с каждым из приведенных выше примеров осуществления изменяется по меньшей мере одно из распределений углов лопасти со стороны ступицы и со стороны банджа и форма сбегающего края лопасти, а также представляется возможность применения в качестве лопастного элемента для соединения между краем со стороны ступицы и краем со стороны банджа или прямолинейного элемента, или криволинейного элемента, поэтому производительность лопастного колеса будет еще более повышена. Заметим, что в приведенных выше примерах осуществления были представлены случаи раздельного использования одного из двух способов для образования лопасти из криволинейных элементов, но также возможно использование для криволинейных элементов комбинирование этих способов. Кроме того, желательно также в третьем примере осуществления, по той же самой причине, что в первом и вто-

ром примерах осуществления, делать диаметр набегающего края лопасти со стороны ступицы меньше по сравнению с диаметром набегающего края лопасти со стороны бандажа.

В каждом из рассмотренных здесь примеров осуществления было в качестве примера дано описание одноосного и многокаскадного центробежного компрессора, но настоящее изобретение может также быть применено конечно к однокаскадному центробежному компрессору. Кроме того, было дано описание центробежного лопастного колеса, в котором для лопастного колеса используется бандаж (боковая обкладка), но настоящее изобретение может аналогичным образом быть применено к лопастному колесу открытого типа, которое не имеет бандажа (боковой обкладки).

Суммируя каждый из приведенных примеров осуществления, второе положение, на котором угол лопасти со стороны бандажа становится минимальным, может быть на набегающем крае со стороны бандажа. И существенным является то, что кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы не имеет точки перегиба на участке, где кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы является выпуклой кверху.

Кроме того, лопасть характеризуется тем, что имеет выпуклую наружу форму, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения, на стороне бандажа, которая противоположна краю со стороны ступицы центробежной машины, имеющей одно или более центробежных лопастных колес, установленных на валу вращения, где каждое из лопастных колес имеет несколько лопастей, которые расположены на ступице через, заданные в периферическом направлении, интервалы на участке между набегающим краем и средней точкой в направлении потока. И лопасть предпочтительно имеет выпуклую внутрь форму, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения, на краю со стороны ступицы на участке между набегающим краем и средней точкой в направлении потока.

Далее, более предпочтительно, чтобы лопасть имела бы со стороны бандажа линию изгиба S-образной формы, а линия изгиба со стороны ступицы - перевернутой S-образной формы, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении, когда направление вращения вала вращения является правым, и лопасть имела бы противоположную форму, когда направление вращения является, соответственно, левым. Предпочтительно, чтобы на сбегавшем крае, который является краевой выпускной частью лопасти, бандажная часть лопасти была бы более наклонена в направлении вращения назад по сравнению с частью со стороны ступицы, а также более предпочтительно, чтобы линия изгиба лопасти со стороны бандажа и линия изгиба лопасти со стороны ступицы пересекались бы, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения.

Кроме того, лопасть может быть образована гладким соединением между несколькими прямолинейными элементами или гладким соединением между несколькими криволинейными элементами. На одном и том же валу вращения может быть установлено несколько центробежных лопастных колес, содержащих любые из лопастей, описанных выше, а также на валу может быть смонтировано одно центробежное лопастное колесо.

Заметим, что все представленное в соответствующих примерах осуществления, описанных выше, является только примерами и не ограничивается этим. Объем изобретения, описанный в прилагаемых пунктах формулы изобретения, и все модификации, которые входят в сущность и объем изобретения, включены в объем прилагаемых пунктов формулы изобретения.

#### **Значения ссылочных цифр**

- 10, 40 - кривая распределения углов лопасти со стороны бандажа;
- 11, 41 - кривая распределения углов лопасти со стороны ступицы;
- 20, 50, 60, 70, 80, 130, 140, 171 - лопасть;
- 21, 51, 61, 71, 85, 131, 141, 152 - набегающий край лопасти;
- 22, 52, 72, 86, 132, 142, 153, 162 - сбегавший край лопасти;
- 23, 53, 73, 133, 143 - кривая края со стороны ступицы (линия изгиба со стороны ступицы);
- 24, 54, 74, 134, 144 - кривая края со стороны бандажа (линия изгиба со стороны бандажа);
- 62 - любое положение на стороне нисходящего потока набегающего края лопасти;
- 63, 74 - линия изгиба;
- 81, 103, 163 - поверхность давления лопасти;
- 82, 104, 164 - всасывающая поверхность лопасти;
- 83 - сторона бандажа;
- 84 - сторона ступицы;
- 100, 160, 172 - ступица;
- 101, 161, 173 - бандаж;
- 102 - сбегавший край лопасти;
- 110, 112 - относительная скорость около всасывающей поверхности лопасти;
- 111, 113 - относительная скорость около поверхности давления лопасти;
- 135 - прямолинейный элемент;
- 136, 146 - меридиональная линия потока при любом положении по высоте лопасти;
- 145 - криволинейный элемент;

150 - поверхность вращения потока;  
 151 - участок лопасти;  
 154 - хорда;  
 155 - участок лопасти после подобного уменьшения в направлении хорды;  
 170 - центробежное лопастное колесо;  
 174 - вал вращения;  
 175 - диффузор;  
 176 - обратный канал;  
 177 - впускное отверстие лопастного колеса;  
 178 - канал нисходящего потока;  
 180 - лопастное колесо;  
 181 - вал вращения;  
 182 - диффузор;  
 183 - обратный канал;  
 184 - камера всасывания;  
 185 - входная направляющая лопатка;  
 186 - отводная камера;  
 200 - центробежная машина;  
 $C, C'$  - абсолютная скорость;  
 $C_m$  - компонент абсолютной скорости в меридиональном направлении;  
 $C_r$  - радиальный компонент абсолютной скорости;  
 $F$  - сила на лопасти;  
 $L$  - ширина прохода между лопастями;  
 $M$  - длина в меридиональном направлении;  
 $R$  - радиус;  
 $S$  - безразмерная длина изгиба;  
 $S_L$  - набегающий край лопасти;  
 $S_{L_h}$  - набегающий край лопасти со стороны ступицы;  
 $S_{L_s}$  - набегающий край лопасти со стороны бандажа;  
 $S_m$  - средняя точка лопасти;  
 $S_T$  - сбегающий край лопасти;  
 $S_{T_h}$  - сбегающий край лопасти со стороны ступицы;  
 $S_{T_s}$  - сбегающий край лопасти со стороны бандажа;  
 $U$  - окружная скорость лопастного колеса;  
 $U_2$  - окружная скорость на выпускном отверстии лопастного колеса;  
 $W, W'$  - относительный расход потока;  $\beta$  - угол лопасти;  
 $\beta_{h_{max}}$  - максимальная величина угла лопасти со стороны ступицы;  
 $\beta_L$  - угол лопасти на набегающем крае;  
 $\beta_{s_{min}}$  - минимальная величина угла лопасти со стороны бандажа;  
 $\theta$  - угол.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Центробежная машина, содержащая вал вращения (174) и центробежное лопастное колесо (170), установленное на валу вращения (174), содержащее ступицу (172), прикрепленную к валу вращения (174); бандаж (173), расположенный так, что его лицевая поверхность обращена к ступице (172) с интервалом; и

лопасти (20), расположенные на ступице (172) с интервалами по ее периферической окружности, каждая лопасть имеет набегающий край (21) с всасывающей стороны и сбегающий край (22) с выпускной стороны, которые представляют собой прямую линию,

при этом каждая лопасть (20) образована таким образом, чтобы расширить верхний предел диапазона расхода потока, когда число Маха относительной скорости потока превышает 1, на основе кривых распределения (10, 11) углов лопасти ( $\beta$ ), при этом каждый угол выражается как отклонение от периферического направления каждой лопасти (20), отличающаяся тем, что

кривая распределения (10) углов лопасти ( $\beta_s$ ) со стороны бандажа лопасти (20), по отношению к линии изгиба со стороны бандажа, соединяющей набегающий край со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) на всасывающей стороне и сбегающий край со стороны бандажа ( $S_{T_s}$ ) на выпускной стороне, имеет минимальное значение ( $\beta_{s_{min}}$ ) на набегающем краю со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ), увеличивается по мере приближения к сбегающему краю со стороны бандажа ( $S_{T_s}$ ) и имеет точку перегиба в первом положении, которое находится ближе к набегающему краю со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) по сравнению со сбегающим краем со стороны банда-

жа ( $S_{T_s}$ ), при этом кривая является выпуклой книзу между набегающим краем со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) и первым положением и становится выпуклой кверху между первым положением и сбегающим краем со стороны бандажа ( $S_{T_s}$ ), и

кривая распределения (11) углов лопасти ( $\beta_h$ ) со стороны ступицы лопасти (20) по отношению к линии изгиба со стороны ступицы, соединяющей набегающий край со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) на всасывающей стороне и сбегающий край со стороны ступицы ( $S_{T_h}$ ) на выпускной стороне, имеет максимальное значение ( $\beta_{h_{max}}$ ) во втором положении, которое находится ближе к набегающему краю со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) по сравнению со сбегающим краем со стороны ступицы ( $S_{T_h}$ ), не имеет точки перегиба между набегающим краем со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) и вторым положением и становится выпуклой кверху между набегающим краем со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) и вторым положением.

2. Центробежная машина, содержащая

вал вращения (174) и

центробежное лопастное колесо (170), установленное на валу вращения (174), содержащее ступицу (172), прикрепленную к валу вращения (174);

бандаж (173), расположенный так, что его лицевая поверхность обращена к ступице (172) с интервалом; и

лопасти (50), расположенные на ступице (172) с интервалами по ее периферической окружности, каждая лопасть имеет выпуклую наружу в радиальном направлении форму (A5A), на участке между набегающим краем (51) и средней точкой в направлении потока, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения (174) со стороны бандажа,

при этом каждая лопасть (50) образована таким образом, чтобы расширить нижний предел диапазона расхода потока, когда число Маха относительной скорости потока превышает 1, на основе кривых распределения (40, 41) углов лопасти ( $\beta$ ), при этом каждый угол выражается как отклонение от периферического направления каждой лопасти (50), отличающаяся тем, что

кривая распределения (40) углов лопасти ( $\beta_s$ ) со стороны бандажа лопасти (50), по отношению к линии изгиба со стороны бандажа, соединяющей набегающий край со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) на всасывающей стороне и сбегающий край со стороны бандажа ( $S_{T_s}$ ) на выпускной стороне, имеет точку перегиба в первом положении и имеет минимальное значение ( $\beta_{s_{min}}$ ) между набегающим краем со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) и первым положением, при этом кривая является выпуклой книзу между набегающим краем со стороны бандажа ( $S_{L_s}$ ) и первым положением и затем становится выпуклой кверху между первым положением и сбегающим краем со стороны бандажа ( $S_{T_s}$ ), и

кривая распределения (41) углов лопасти ( $\beta_h$ ) со стороны ступицы лопасти (50) по отношению к линии изгиба со стороны ступицы, соединяющей набегающий край со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) на всасывающей стороне и сбегающий край со стороны ступицы ( $S_{T_h}$ ) на выпускной стороне, имеет максимальное значение ( $\beta_{h_{max}}$ ) во втором положении, которое находится ближе к набегающему краю со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) по сравнению со сбегающим краем со стороны ступицы ( $S_{T_h}$ ), не имеет точки перегиба между набегающим краем со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) и вторым положением и становится выпуклой кверху между набегающим краем со стороны ступицы ( $S_{L_h}$ ) и вторым положением,

при этом каждая лопасть имеет выпуклую внутрь в радиальном направлении форму (A5B) на участке между набегающим краем (51) и средней точкой в направлении потока, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения (174), со стороны ступицы,

при этом каждая из лопастей (50) имеет линию изгиба (54) со стороны бандажа S-образной формы и линию изгиба (53) со стороны ступицы инвертированной S-образной формы, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении, когда направление вращения вала вращения (174) является правым, и лопасть (50) имеет соответственно противоположные формы линии изгиба (54) со стороны бандажа и линии изгиба (53) со стороны ступицы, когда направление вращения является левым.

3. Центробежная машина в соответствии с п.2, отличающаяся тем, что на сбегающем крае (72), который является краевой выпускной частью лопасти (70), сторона бандажа лопасти (70) более наклонена назад в направлении вращения по сравнению со стороной ступицы.

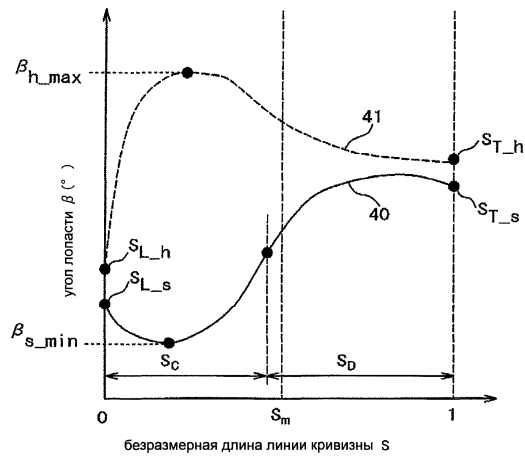
4. Центробежная машина в соответствии с п.2 или 3, отличающаяся тем, что линия изгиба (74) со стороны бандажа и линия изгиба (73) лопасти (70) со стороны ступицы пересекаются, если смотреть с всасывающей стороны в аксиальном направлении вала вращения (174).

5. Центробежная машина в соответствии с любым из пп.1-4, отличающаяся тем, что лопасть (130) образована гладким соединением обоих концов нескольких прямолинейных элементов (135) соответственно.

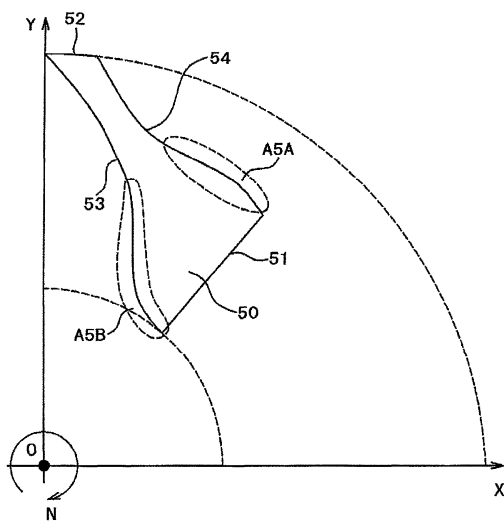
6. Центробежная машина в соответствии с любым из пп.1-4, отличающаяся тем, что лопасть (140) образована гладким соединением обоих концов нескольких криволинейных элементов (145) соответственно.

7. Центробежная машина в соответствии с любым из пп.1-6, отличающаяся тем, что на одном и том же валу вращения (181) смонтированы несколько центробежных лопастных колес (180).

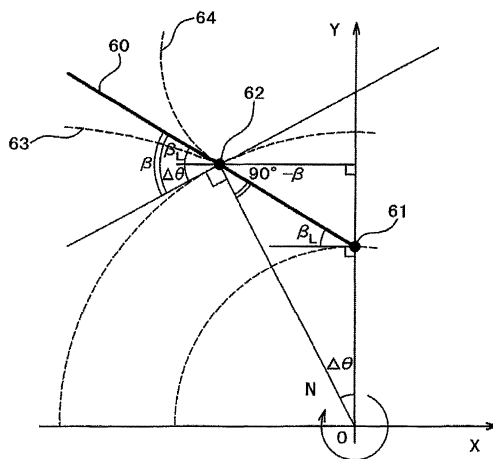




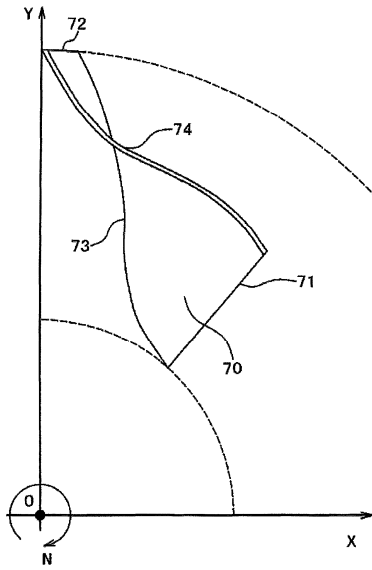
Фиг. 4



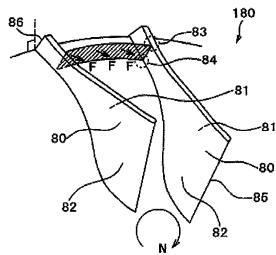
Фиг. 5



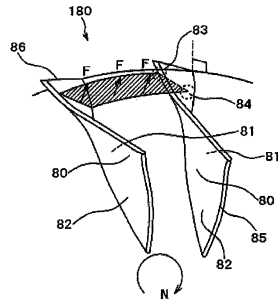
Фиг. 6



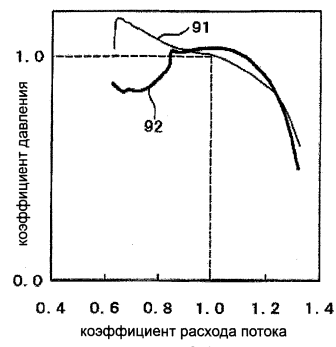
Фиг. 7



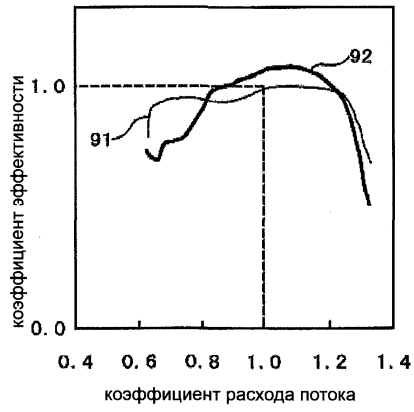
Фиг. 8А



Фиг. 8В

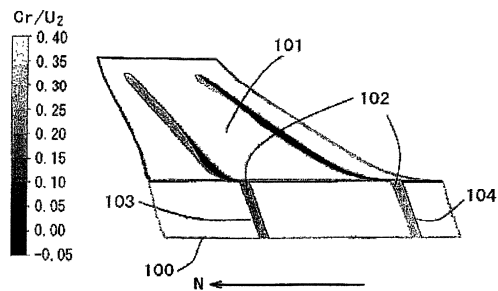


Фиг. 9А



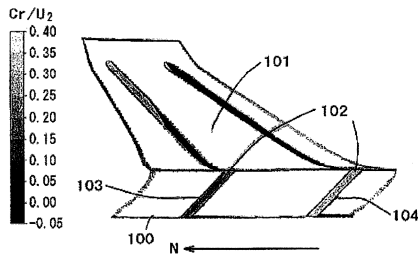
Фиг. 9В

безразмерная радиальная скорость потока

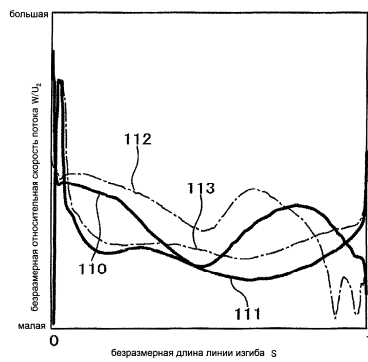


Фиг. 10А

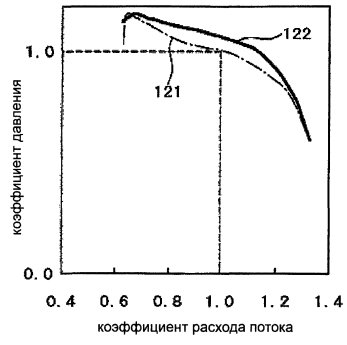
безразмерная радиальная скорость потока



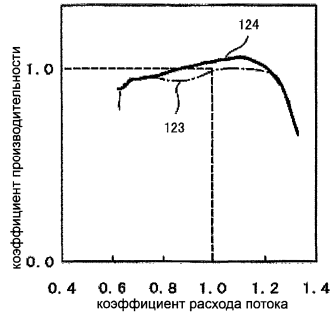
Фиг. 10В



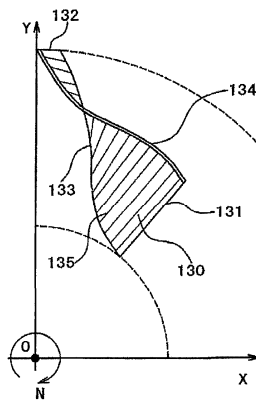
Фиг. 11



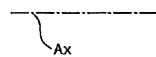
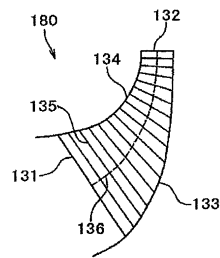
Фиг. 12А



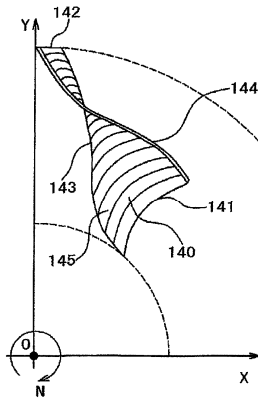
Фиг. 12В



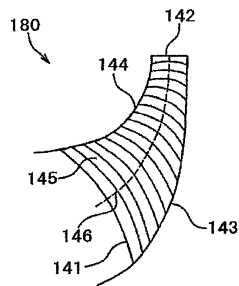
Фиг. 13А



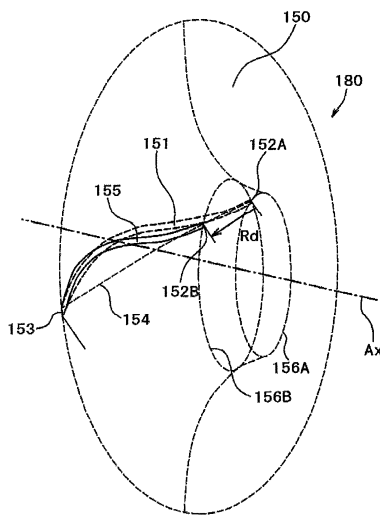
Фиг. 13В



Фиг. 14А

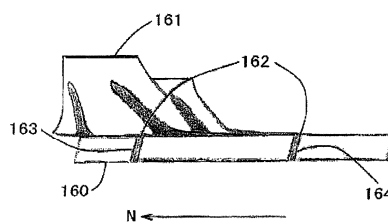
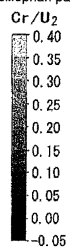


Фиг. 14В



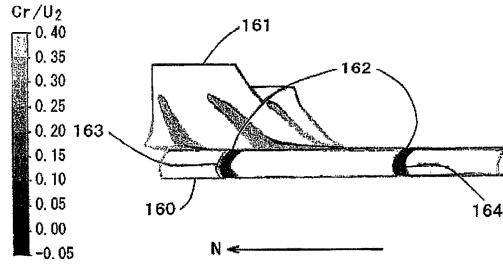
Фиг. 15

безразмерная радиальная скорость потока

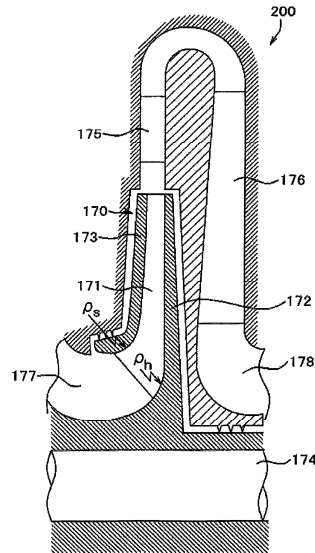


Фиг. 16А

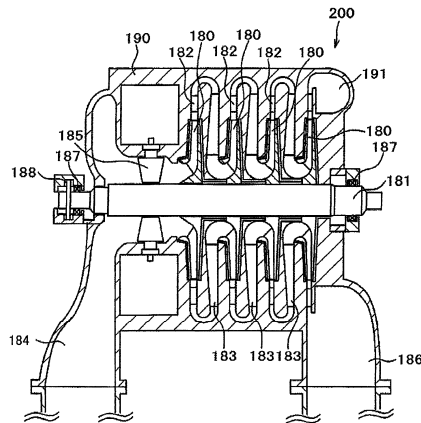
безразмерная радиальная скорость потока



Фиг. 16В



Фиг. 17



Фиг. 18