



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F01D 5/141 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2018108196, 05.08.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.08.2016

Дата регистрации:
24.07.2020

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
11.08.2015 FR FR 1557660

(43) Дата публикации заявки: 13.09.2019 Бюл. № 26

(45) Опубликовано: 24.07.2020 Бюл. № 21

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 12.03.2018

(86) Заявка РСТ:
FR 2016/052043 (05.08.2016)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2017/025684 (16.02.2017)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

МОНТЕС ПАРРА Рохер Фелипе (FR),
КОЖАНД Прасад (FR)

(73) Патентообладатель(и):

САФРАН ЭРКРАФТ ЭНДЖИНЗ (FR)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 6331100 B1, 18.12.2001. US
2010054946 A1, 04.03.2010. WO 2012080669 A1,
21.06.2012. GB 2151310 A, 17.07.1985. US 7121792
B1, 17.10.2006.

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2

(54) ЛОПАТКА РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ, ДИСК С ЛОПАТКАМИ, РОТОР И ТУРБОМАШИНА

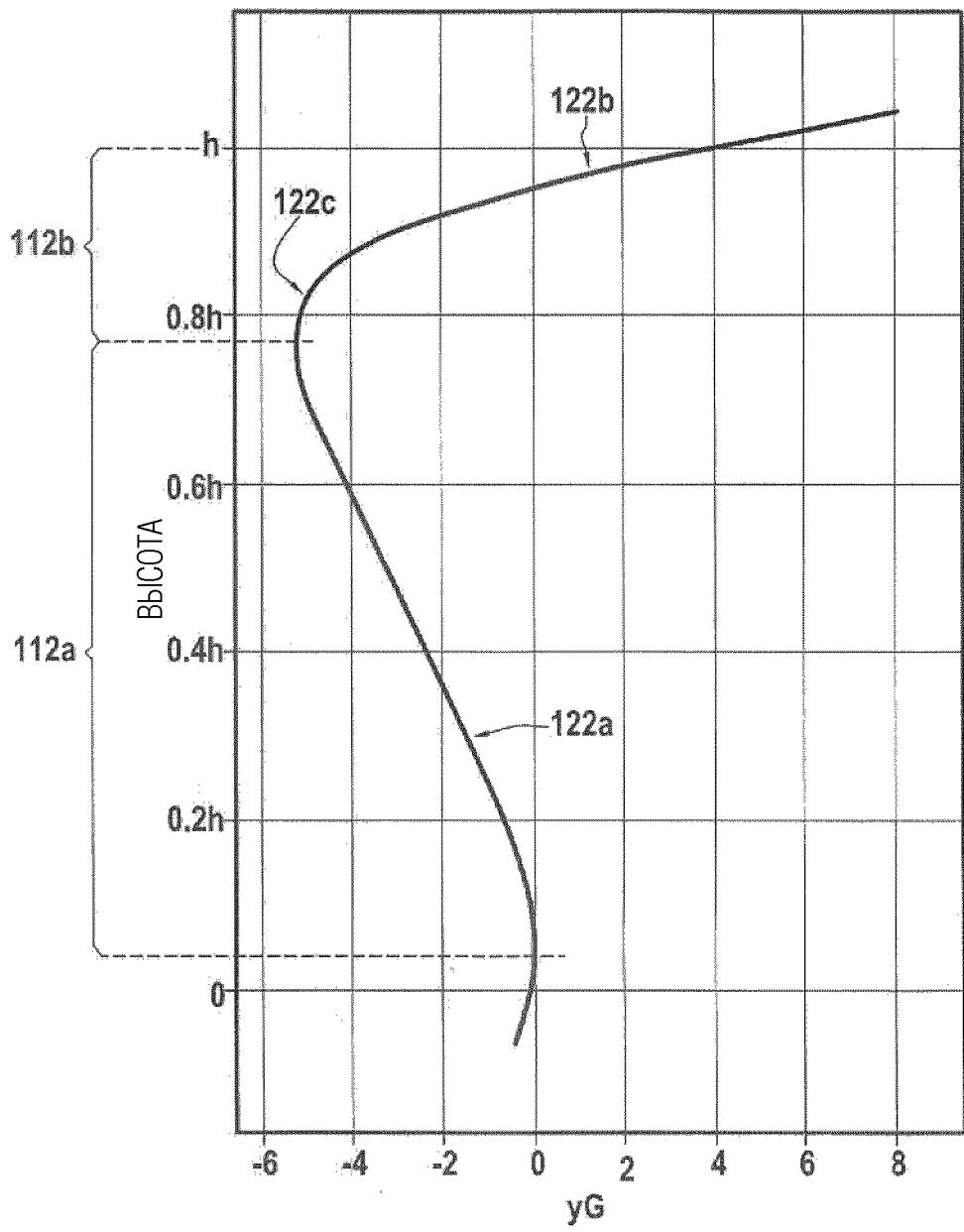
(57) Реферат:

Изобретение относится к области лопаток роторов турбомашин. Изобретение позволяет улучшить аэродинамические и механические свойства лопаток роторов турбомашин. Лопатка ротора турбомашины содержит хвостовик лопатки и вершину лопатки, разнесенные на высоту (h) лопатки, вместе с по меньшей мере одним промежуточным участком (112a),

представляющим отрицательный тангенциальный наклон к спинке пера, и дальним участком (112b), расположенным между промежуточным участком (112a) и вершиной лопатки и представляющим положительный тангенциальный наклон к корыту пера, в которой дальний участок (112b) продолжается не более чем на 30% от указанной высоты (h) лопатки. 4 н. и 9 з.п. ф-лы, 18 ил.

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2



ФИГ. 5

RUSSIAN FEDERATION



(19)

RU

(11)

2 727 823⁽¹³⁾ C2

(51) Int. Cl.

F01D 5/14 (2006.01)

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

F01D 5/141 (2019.08)

(21)(22) Application: 2018108196, 05.08.2016

(24) Effective date for property rights:
05.08.2016

Registration date:
24.07.2020

Priority:

(30) Convention priority:
11.08.2015 FR FR 1557660

(43) Application published: 13.09.2019 Bull. № 26

(45) Date of publication: 24.07.2020 Bull. № 21

(85) Commencement of national phase: 12.03.2018

(86) PCT application:
FR 2016/052043 (05.08.2016)

(87) PCT publication:
WO 2017/025684 (16.02.2017)

Mail address:

**129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**MONTES PARRA Roger Felipe (FR),
COJANDE Prasaad (FR)**

(73) Proprietor(s):

SAFRAN AIRCRAFT ENGINES (FR)

R U
2 7 2 7 8 2 3
C 2
C 3
8 2 3
2 7 2 7 8 2 3
R U

(54) TURBOMACHINE ROTOR BLADE, DISC WITH BLADES, ROTOR AND TURBOMACHINE

(57) Abstract:

FIELD: turbines or turbomachines.

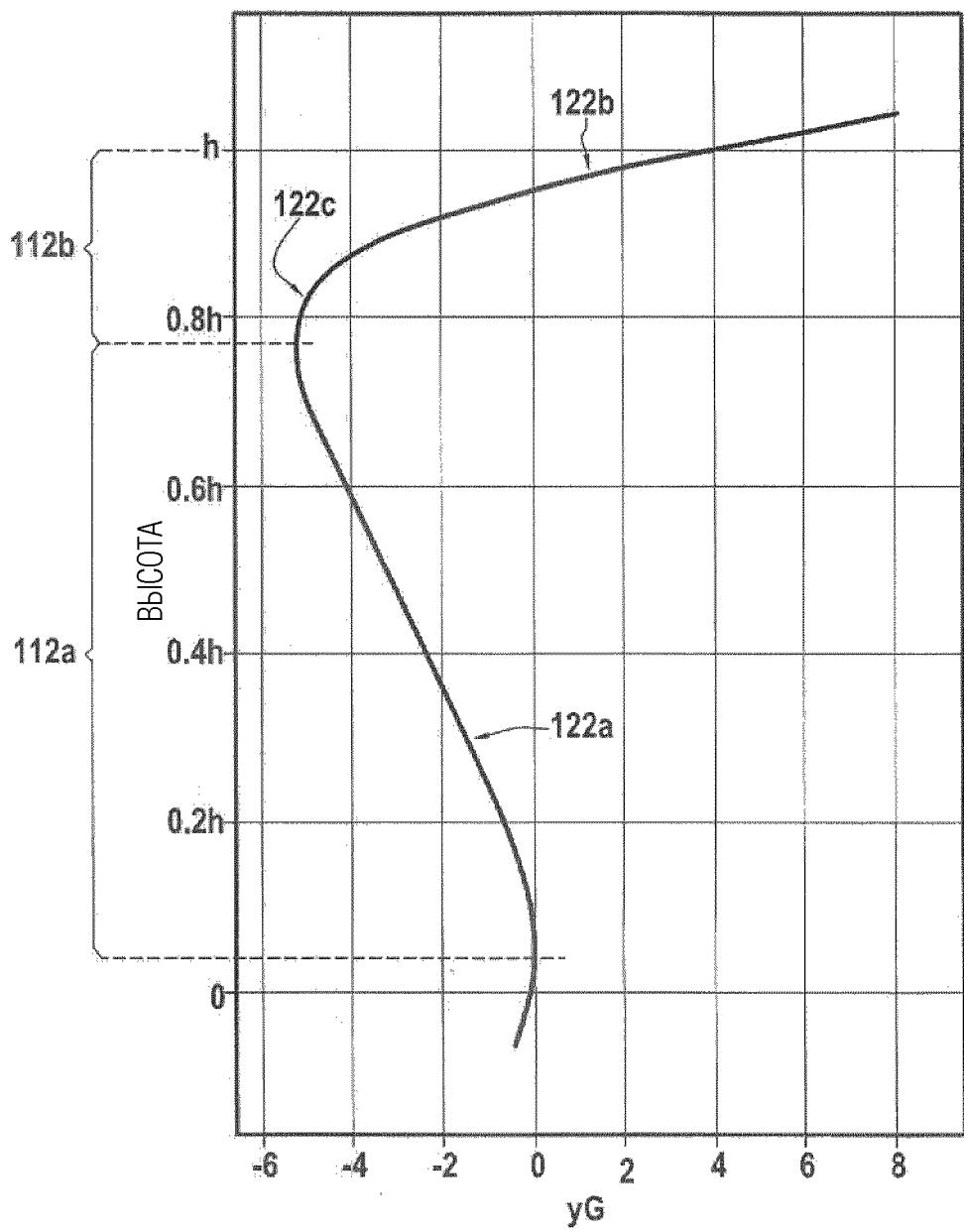
SUBSTANCE: invention relates to blades of rotors of turbomachines. Turbomachine rotor blade comprises blade root and blade top spaced apart by blade height (h) together with at least one intermediate section (112a), representing negative tangential inclination to feather back, and far section (112b), located between intermediate section (112a) and blade tip and

representing positive tangential inclination to airfoil trough, in which far section (112b) extends not more than 30 % of said height (h) of the blade.

EFFECT: invention allows improving aerodynamic and mechanical properties of blades of rotors of turbomachines.

13 cl, 18 dwg

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2



ФИГ. 5

R U 2 7 2 7 8 2 3 C 2

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к области лопаток или направляющих лопаток турбомашин и, в частности, к области лопаток роторов турбомашин.

В настоящем контексте термин «турбомашина» используется, чтобы обозначать

какую-либо машину, в которой энергия может переноситься между потоком текучей среды и по меньшей мере одним множеством лопаток, таких как, например, компрессор, насос, турбина или комбинация по меньшей мере двух из них. В описании ниже выражения «выше по потоку» и «ниже по потоку» определяются относительно нормального направления потока текучей среды через турбомашину.

Такая турбомашина может содержать множество каскадов, каждый каскад обычно содержит два набора лопаток и направляющих лопаток, а именно, набор подвижных лопаток и набор направляющих лопаток. Каждый набор лопаток или направляющих лопаток содержит множество лопаток или направляющих лопаток, которые смешены друг от друга в поперечном направлении. Обычно такие лопатки или направляющие лопатки размещаются радиально вокруг центральной оси А. Таким образом, такой набор образует ротор, когда он представляет собой множество подвижных лопаток, или статор, когда он представляет собой множество направляющих лопаток. Ближний конец каждой лопатки или направляющей лопатки относительно центральной оси А обычно называется ее хвостовиком, в то время как периферийный конец обычно называется ее вершиной. Расстояние между хвостовиком и вершиной называется «высотой». Между своим хвостовиком и своей вершиной лопатка или направляющая лопатка состоит из ряда аэродинамических профилей, проходящих по существу перпендикулярно радиальной оси Z. В этом контексте используется выражение «по существу перпендикулярный», означающее, что плоскость каждого профиля может представлять угол относительно радиальной оси Z, который примерно равен 90°, например, находясь в диапазоне от 60° до 120°.

Геометрическая форма лопаток представляет собой предмет крупных проектных работ для оптимизации аэродинамического поведения лопаток, тем самым повышая эффективность вращающихся узлов, таких как компрессоры, вентиляторы или турбины, частью которых они являются. Таким образом, инженеры-аэродинамики предлагают отношения для укладки аэродинамических профилей, которые оптимизированы с точки зрения аэродинамики.

Однако такие отношения укладки не обязательно оптимизированы или даже не приемлемы с точки зрения механики. Например, были предложены отношения укладки, которые особенно эффективны с точки зрения аэродинамики, в которых основная часть лопатки консольно выступает наружу относительно остальной части лопатки. В таком случае такая большая консольно выступающая наружу масса очень чувствительна к центробежным силам, возникающим в результате вращения ротора, и приводит к значительному изгибу верхней части аэродинамического профиля, тем самым приводя к большим механическим напряжениям в середине аэродинамического профиля со статическими напряжениями, которые слишком высоки в «пределных» условиях полета, т.е. в аварийных условиях полета. При таких обстоятельствах такие лопатки имеют только очень небольшой динамический запас, и в случае удара или в случае помпажа вращающегося узла они плохо выдерживают усталость.

Наоборот, другие отношения укладки, которые оптимизированы с точки зрения механики, были предложены инженерами-механиками, но они не были приняты, поскольку их аэродинамические характеристики являются недостаточными.

В связи с этим существует действительная необходимость в лопатке, которая приносит

выгоду как с точки зрения хороших аэродинамических свойств, так и с точки зрения хороших механических свойств.

ЗАДАЧА И СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к лопатке ротора турбомашины, содержащей

- 5 хвостовик лопатки и вершину лопатки, разделенные по высоте лопатки, вместе с по меньшей мере одним промежуточным участком, представляющим отрицательный тангенциальный наклон, и периферийным участком, расположенным между промежуточным участком и головкой лопатки и представляющим положительный тангенциальный наклон, когда периферийный участок продолжается не более чем на
- 10 30% от указанной высоты лопатки.

Такая конфигурация позволяет значительно уменьшить массу лопатки, которая консольно выступает наружу, и, таким образом, уменьшить изгиб верхней части лопатки и одновременно уменьшить уровень статических напряжений, при этом сохраняя хорошие аэродинамические свойства.

- 15 Более того, повышения механической прочности, полученные таким образом, позволяют облегчить конструкцию лопатки и, в частности, уменьшить ее толщину, тем самым улучшая ее аэродинамические свойства.

Также это отношение укладки оставляет свободу выбора конструкции относительно геометрической формы лопатки в осевом направлении, тем самым позволяя свободно 20 оптимизировать лопатку в этом направлении, чтобы оптимизировать ее аэродинамические и/или механические свойства в зависимости от конкретных требований.

- 25 В некоторых вариантах выполнения указанный периферийный участок находится непосредственно смежно указанной вершине лопатки.
- В некоторых вариантах выполнения указанный периферийный участок находится непосредственно смежно указанному промежуточному участку.

В некоторых вариантах выполнения соединение между указанным промежуточным участком и указанным периферийным участком расположено на уровне, находящемся в диапазоне от 75% до 80% от высоты лопатки от хвостовика лопатки.

- 30 В некоторых вариантах выполнения указанный периферийный участок продолжается не более чем на 25% от высоты лопатки. Это дополнительно уменьшает консольно выступающую наружу массу.

В некоторых вариантах выполнения указанный периферийный участок продолжается по меньшей мере на 5% от высоты лопатки.

- 35 В некоторых вариантах выполнения указанный периферийный участок продолжается по меньшей мере на 15% от высоты лопатки.

В некоторых вариантах выполнения проекция на радиальную плоскость линии, проходящей через центры тяжести каждого из тангенциальных сечений лопатки, имеет гамма-форму. Кривая, изображающая тангенциальную координату, известную как y_G , 40 центра тяжести каждого сечения лопатки в зависимости от его положения вдоль лопатки, таким образом, представляет по существу прямолинейный поднимающийся участок, придающий повышенную жесткость нижней части лопатки, и субгоризонтальный участок, который оставляет только небольшой вес, консольно выступающий наружу. Более того, выраженная кривизна на сопряжении между промежуточным участком и 45 периферийным участком лопатки служит для того, чтобы разделять поток силы между верхней частью и нижней частью лопатки, тем самым служа для уменьшения величины напряжения, создаваемого в нижней части лопатки в результате изгиба в верхней части лопатки.

В некоторых вариантах выполнения проекция на радиальную плоскость линии, проходящей через центры тяжести каждого тангенциального сечения лопатки, имеет в промежуточном участке лопатки участок, который является по существу прямолинейным. Другими словами, кривая, изображающая тангенциальную координату уG в зависимости от положения, имеет вторую производную, которая по существу равна нулю в этом участке. Это приводит к большей жесткости в промежуточном участке лопатки, таким образом, увеличивая ее механическую прочность.

5 В некоторых вариантах выполнения указанный по существу прямолинейный участок продолжается по меньшей мере на 30% от высоты лопатки, предпочтительно по меньшей 10 мере на 40% от высоты лопатки, более предпочтительно по меньшей мере на 50% от высоты лопатки.

15 В некоторых вариантах выполнения указанный по существу прямолинейный участок продолжается по меньшей мере до уровня, расположенного на 50%, предпочтительно 55%, предпочтительно 60%, более предпочтительно 65% от высоты лопатки от хвостовика лопатки.

20 В некоторых вариантах выполнения указанный по существу прямолинейный участок продолжается по меньшей мере от уровня, расположенного не более чем на 30%, предпочтительно не более чем на 20% от высоты лопатки от хвостовика лопатки.

25 В некоторых вариантах выполнения разница между тангенциальными координатами центров тяжести сечений лопатки, расположенных, во-первых, на вершине лопатки и, во-вторых, на сопряжении между промежуточным участком и периферийным участком, больше 150%, предпочтительно больше 180% разницы между тангенциальными координатами центров тяжести сечений лопатки, расположенных, во-первых, на хвостовике лопатки и, во-вторых, на сопряжении между промежуточным участком и 30 периферийным участком. Такая лопатка имеет высокую величину стреловидности на вершине лопатки и обладает хорошими аэронавтическими и механическими свойствами, в частности, с точки зрения статических напряжений.

35 В других вариантах выполнения разница между тангенциальными координатами центров тяжести сечений лопатки, расположенных, во-первых, на вершине лопатки и, во-вторых, на сопряжении между промежуточным участком и периферийным участком, лежит в диапазоне от 100% до 150%, предпочтительно в диапазоне от 110% до 140% разницы между тангенциальными координатами центров тяжести сечений лопатки, расположенных, во-первых, на хвостовике лопатки и, во-вторых, на сопряжении между промежуточным участком и периферийным участком. Такая лопатка представляет 40 стреловидность на вершине лопатки, которая менее выражена, чем в предыдущей ситуации, тем самым облегчая ее интеграцию в модуль турбомашины, при этом сохраняя хорошие аэронавтические и механические свойства. В частности, это позволяет увеличить расстояние между вершинами лопатки ротора и направляющей лопаткой статора, расположенной выше по потоку.

45 В некоторых вариантах выполнения толщина лопатки во всех точках составляет менее 8% от высоты лопатки и предпочтительно менее 6%. Это уменьшенная толщина обеспечивает лопатку хорошими аэродинамическими свойствами.

В некоторых вариантах выполнения толщина периферийного участка меньше 5% от высоты лопатки, предпочтительно меньше 3%.

50 Настоящее описание также обеспечивает цельный диск с лопатками, имеющий множество лопаток в соответствии с любым из вышеприведенных вариантов выполнения. Такой цельный диск с лопатками имеет преимущества надежности и простоты. Однако лопатки настоящего описания альтернативно могут представлять

собой отдельно закрепленные лопатки, например, имеющие крепежный элемент елочной формы под хвостовиком лопатки.

Настоящее описание также обеспечивает ротор, имеющий множество лопаток в соответствии с любым из вышеприведенных вариантов выполнения.

⁵ Настоящее описание также обеспечивает турбомашину, имеющую диск или ротор в соответствии с любым из вышеприведенных вариантов выполнения.

Вышеупомянутые и другие характеристики и преимущества проявляются при прочтении следующего подробного описания вариантов выполнения предлагаемой лопатки. Подробное описание приведено со ссылкой на прилагаемые чертежи.

¹⁰ КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Изобретение может быть хорошо понято и его преимущества лучше проявляются при прочтении следующего подробного описания варианта выполнения, показанного в качестве неограничивающего примера. Описание приведено со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых:

¹⁵ Фигура 1 представляет собой схематическое продольное сечение турбомашины;

Фигура 2А представляет собой схематический вид в перспективе ротора турбомашины;

Фигура 2В представляет собой схематический вид в перспективе детали ротора на Фигуре 2А;

²⁰ Фигура 2С представляет собой вид в сечении одной из лопаток ротора на Фигуре 2А по плоскости ПС-ПС, показанной на Фигуре 2В;

Фигура 3А показывает лопатку ротора с обратной стреловидностью;

Фигура 3В показывает лопатку ротора с прямой стреловидностью;

²⁵ Фигура 3С показывает лопатку ротора, представляющую отрицательный тангенциальный наклон;

Фигура 3Д показывает лопатку ротора, представляющую положительный тангенциальный наклон;

Фигура 4 показывает примерную лопатку изобретения;

³⁰ Фигура 5 представляет собой график, показывающий изменение тангенциального наклона первой лопатки изобретения между хвостовиком и вершиной;

Фигура 6 представляет собой график, показывающий изменение тангенциального наклона второй лопатки изобретения между хвостовиком и вершиной;

Фигура 7 представляет собой график, показывающий изменение тангенциального наклона эталонной лопатки известного уровня техники между хвостовиком и вершиной;

³⁵ Фигуры 8А, 8В показывают уровни статического напряжения первой примерной лопатки;

Фигуры 9А, 9В показывают уровни статического напряжения второй примерной лопатки;

Фигуры 10А, 10В показывают уровни статического напряжения обычной лопатки известного уровня техники.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Фигура 1 показывает иллюстративный пример турбомашины и, конкретнее, двухконтурного осевого турбореактивного двигателя 1. Показанный турбореактивный двигатель 1 имеет вентилятор 2, компрессор 3 низкого давления, компрессор 4 высокого давления, камеру 5 сгорания, турбину 6 высокого давления и турбину 7 низкого давления. Вентилятор 2 и компрессор 3 низкого давления соединяются с турбиной 7 высокого давления посредством первого трансмиссионного вала 9, в то время как компрессор 4 высокого давления и турбина 6 высокого давления соединяются вместе

посредством второго трансмиссионного вала 10. При эксплуатации поток воздуха, сжимаемого посредством компрессоров 3 и 4 низкого и высокого давления, поддерживает горение в камере 5 сгорания, и расширение газа сгорания приводит в действие турбины 6 и 7 высокого и низкого давления. Таким образом, посредством валов 9 и 10 турбины 6 и 7 приводят в действие вентилятор 2 и компрессоры 3 и 4. Воздух, нагоняемый вентилятором 2, и газ сгорания, покидающий турбореактивный двигатель 1 через реактивное сопло (не показано) ниже по потоку от турбин 6 и 7, вместе оказывают реактивный толчок на турбореактивный двигатель 1 и через турбореактивный двигатель на транспортное средство, такое как самолет (не показан).

Каждый компрессор 3, 4 и каждая турбина 6, 7 турбореактивного двигателя 1 содержат множество каскадов, причем каждый каскад формируется из неподвижного множества направляющих лопаток или статора и вращающегося множества лопаток или ротора. Ротор 11 осевого компрессора схематично показан на Фигуре 2А. Ротор 11 имеет множество лопаток 12, размещенных радиально вокруг оси А вращения ротора 11, причем эта ось по существу параллельна основному направлению потока рабочей текучей среды через турбореактивный двигатель 1. Лопатки 12 могут быть объединены как одна деталь в роторе 11, таким образом, образуя цельный диск с лопатками, или иначе они могут быть сформированы отдельно и присоединены к ротору с помощью крепежных средств, которые обычно известны в уровне техники, таких как крепежные элементы с елочными пазами.

Как показано более подробно на Фигуре 2В, каждая лопатка 12 представляет трехмерную систему координат, имеющую три ортогональные оси X, Y и Z. Ось X параллельна оси А вращения ротора 11, ось Y тангенциальна к направлению R вращения лопаток 12 вокруг оси А вращения, а ось Z представляет собой радиальную ось в направлении, пересекающем ось А вращения. Каждая лопатка 12 содержит хвостовик 13 лопатки и вершину 14 лопатки, которые разнесены на высоту h лопатки в направлении радиальной оси Z. Между хвостовиком 13 лопатки и вершиной 14 лопатки лопатка 12 содержит ряд аэродинамических профилей 15 в плоскостях, перпендикулярных радиальной оси Z, образуя передний край 16 в направлении вверх по потоку, задний край 17 в направлении вниз по потоку, спинку 18 пера и корыто 19 пера. В компрессоре или вентиляторном роторе направление R вращения при обычной эксплуатации является таким, что каждая лопатка 12 движется к своему корыту 19 пера.

Один такой профиль 15 лопатки 12 показан на Фигуре 2С. Каждый профиль 15 представляет хорду С между передним краем 16 и задним краем 17 и центр CG тяжести, определенный как геометрический центр масс профиля 15. В области лопаток или направляющих лопаток турбомашины наклон линии, проходящей через центры CG тяжести последовательных профилей 15, относительно радиальной оси Z используется для определения стреловидности и тангенциального наклона лопатки или направляющей лопатки 12. Таким образом, при прохождении к вершине 14 эта линия 20 наклоняется под углом -i наклона в направлении вверх по потоку в плоскости XZ, как показано на Фигуре 3А, лопатка 12 представляет обратную стреловидность. В отличие от этого, когда эта линия 20 наклоняется под углом i наклона в направлении вниз по потоку в той же плоскости, как показано на Фигуре 3В, лопатка 12 представляет прямую стреловидность. Подобным образом, тангенциальный наклон определяется углом наклона линии 20 относительно радиальной оси Z в плоскости YZ. Таким образом, когда линия 20 наклоняется к спинке 18 пера при прохождении к вершине 14 (и, таким образом, наклоняется в направлении, противоположном направлению R вращения ротора), лопатка 12 наклоняется под тангенциальным углом -j наклона, который

является отрицательным, как показано на Фигуре 3С. В отличие от этого, когда этот угол наклона направлен к корыту 19 пера (и, таким образом, в направлении R вращения ротора), лопатка 12 наклоняется под тангенциальным углом δ наклона, который является положительным, как показано на Фигуре 3D. Помимо стреловидности и

- 5 тангенциального наклона лопатки или направляющие лопатки турбомашины, как правило, представляют формы, которые являются сложными, с профилями 15, в которых угол атаки, кривизна, толщина и хорда С также могут изменяться вдоль оси Z.

Фигура 4 показывает лопатку или направляющую лопатку 112 в первом варианте выполнения изобретения, который делает возможным уменьшение этого недостатка 10 лопаток или направляющих лопаток с обратной стреловидностью. Эта лопатка 112 также имеет хвостовик 113 лопатки, вершину 114 лопатки, передний край 116, задний край 117, спинку 118 пера и корыто 119 пера, и она также состоит из ряда аэродинамических профилей 115 в пределах высоты h лопатки между хвостовиком 113 лопатки и вершиной 114 лопатки.

- 15 Фигура 5 показывает отношение yG этой лопатки 112, т.е. то, как тангенциальная координата yG центра CG тяжести изменяется вдоль радиальной оси Z. На Фигуре 5 ось yG абсцисс проградуирована в миллиметрах. Угол наклона этой кривой, т.е. первая производная от yG , соответствует тангенциальному наклону лопатки: таким образом, когда кривая идет влево, т.е. yG является отрицательной, соответствующий участок 20 лопатки имеет отрицательный тангенциальный наклон, а, когда кривая идет вправо, т.е. yG является положительной, соответствующий участок лопатки имеет положительный тангенциальный наклон. Кривизна этой кривой, т.е. вторая производная yG , соответствует кривизне лопатки в тангенциальном направлении.

На этой Фигуре может быть видно, что эта лопатка 112 представляет промежуточный 25 участок 112a с отрицательным тангенциальным наклоном, занимающий около 70% от высоты h лопатки до размера, соответствующего около 75% от высоты h лопатки.

Лопатка 112 также представляет периферийный участок 112b с положительным тангенциальным наклоном, продолжающийся между промежуточным участком 112a и вершиной 114 лопатки, и, таким образом, занимающий около 25% от высоты h лопатки.

- 30 Также может быть видно, что промежуточный участок 112a имеет по существу прямолинейный участок 122a, продолжающийся почти между размерами, соответствующими 15% и 70% от высоты h лопатки. Периферийный участок 112b также имеет по существу прямолинейный участок 122b, продолжающийся почти от размера, соответствующего 90% от высоты h лопатки, до вершины 114 лопатки. Таким образом, 35 кривая для yG имеет гамма-форму. Затем кривизна лопатки концентрируется в ограниченной зоне 122c лопатки, главным образом между размерами, соответствующими 70% и 90% от высоты h лопатки: таким образом, кривая для yG поворачивает более чем на 90° на менее чем 20% от высоты h лопатки, тем самым способствуя разделению сил, действующих на промежуточный участок 112a и 40 периферийный участок 112b лопатки 112.

Также может быть видно, что периферийный участок 112b продолжается далеко от положительной стороны yG для достижения около 4 мм на вершине лопатки, т.е. практически столько же по абсолютной величине, что и координата, достигаемая на отрицательной стороне yG на сопряжении между промежуточным участком 112a и 45 периферийным участком 112b.

Фигуры 8А и 8В представляют собой снимки экрана программного обеспечения для вычисления механических напряжений: они показывают уровни статического напряжения соответственно на спинке пера и на корыте пера лопатки первого примера.

Для сравнения, Фигуры 10А и 10В показывают уровни статического напряжения соответственно на спинке пера и на корыте пера эталонной лопатки известного уровня техники, для которой отношение yG укладки, как показано на Фигуре 8, имеет S-образную форму.

Таким образом, может быть видно, что максимальный уровень напряжения на спинке пера первой примерной лопатки составляет 401 мегапаскаль (МПа), в то время как для эталонной лопатки этот максимальный уровень составляет 542 МПа, т.е. снижение составляет 26%. На корыте пера максимальный уровень напряжения составляет 368 МПа для лопатки первого примера по сравнению с 457 МПа для эталонной лопатки, т.е. снижение составляет 19%.

Фигура 6 показывает отношение yG для второй примерной лопатки. На этой Фигуре может быть видно, что вторая лопатка представляет по существу ту же гамма-форму, за исключением того, что ее периферийный участок 212b не продолжается так далеко, как в первом примере, достигая около 1,5 мм на вершине лопатки, т.е. около 30% по абсолютной величине координаты, достигаемой с отрицательным yG на сопряжении между промежуточным участком 212a и периферийным участком 212b.

Не смотря на это, можно видеть наличие промежуточного участка 212a отрицательного тангенциального наклона, который занимает около 70% от высоты h лопатки до размера, соответствующего около 75% от высоты h лопатки, и периферийного участка 212bc с положительным тангенциальным наклоном, продолжающегося между промежуточным участком 212a и вершиной лопатки и, таким образом, занимающего около 25% от высоты h лопатки.

Промежуточный участок 212a также имеет по существу прямолинейный участок 222a, продолжающийся почти между размерами, соответствующими 15% и 70% от высоты h лопатки. Периферийный участок 212b также имеет по существу прямолинейный участок 222b, продолжающийся почти от размера, соответствующего 90% от высоты h лопатки, до вершины 114 лопатки. Затем кривизна лопатки концентрируется в ограниченной зоне 222c лопатки, главным образом между размерами, соответствующими 70% и 90% от высоты h лопатки: таким образом, кривая для yG поворачивает более чем на 90° на менее чем 20% от высоты h лопатки, тем самым способствуя разделению сил, действующих на промежуточный участок 112a и периферийный участок 112b лопатки.

На Фигурах 9А и 9В представлены еще несколько снимков экрана программного обеспечения для вычисления механических напряжений: они показывают уровни статического напряжения соответственно на спинке пера и на корыте пера лопатки второго примера.

Таким образом, может быть видно, что максимальный уровень напряжения на спинке пера второй примерной лопатки составляет 401 МПа, в то время как для эталонной лопатки этот максимальный уровень составляет 542 МПа, т.е. снижение составляет 26%. На корыте пера максимальный уровень напряжения составляет 331 МПа для лопатки первого примера по сравнению с 457 МПа для эталонной лопатки, т.е. снижение составляет 28%.

Варианты выполнения, представленные в настоящем описании, приведены в качестве неограничивающих иллюстраций, и в свете данного описания специалист в области техники может легко модифицировать эти варианты выполнения или может рассматривать другие, в то же время оставаясь в пределах объема охраны изобретения.

Кроме того, различные характеристики этих вариантов выполнения могут быть использованы отдельно или могут быть объединены друг с другом. Когда они

объединяются, эти характеристики могут быть объединены, как описано выше, или другими способами, изобретение не ограничивается конкретными комбинациями, описанными в настоящем описании. В частности, если не указано обратное, характеристика, описанная со ссылкой на какой-либо один вариант выполнения, может 5 быть применена аналогичным образом к любому другому варианту выполнения.

(57) Формула изобретения

1. Лопатка ротора турбомашины, содержащая спинку (18) пера, корыто (19) пера, хвостовик (113) лопатки и вершину (114) лопатки, разнесенные на высоту (h) лопатки, 10 по меньшей мере один промежуточный участок (112a), имеющий отрицательный тангенциальный наклон к спинке (18) пера, и периферийный участок (112b), расположенный между промежуточным участком (112a) и вершиной (114) лопатки и имеющий положительный тангенциальный наклон к корыту (19) пера;

при этом периферийный участок (112b) проходит не более чем на 30% от высоты (h) 15 лопатки; и

в которой проекция на радиальную плоскость линии, проходящей через центры тяжести каждого тангенциального сечения (115) лопатки (110), имеет в промежуточном участке (112a) лопатки участок (122a), который по существу является прямолинейным, и который проходит по меньшей мере на 40% от высоты (h) лопатки.

20 2. Лопатка по предыдущему пункту, в которой указанный периферийный участок (112b) расположен непосредственно смежно с вершиной (114) лопатки, и

при этом периферийный участок (112b) расположен непосредственно смежно с промежуточным участком (112a).

25 3. Лопатка по любому предыдущему пункту, в которой периферийный участок (112b) проходит не более чем на 25% от высоты (h) лопатки.

4. Лопатка по любому предыдущему пункту, в которой периферийный участок (112b) продолжается по меньшей мере на 5% от высоты (h) лопатки.

5. Лопатка по любому из пп. 1-4, в которой по существу прямолинейный участок (122a) проходит по меньшей мере до уровня, расположенного на 50%, предпочтительно 30% от высоты (h) лопатки от хвостовика (113) лопатки.

6. Лопатка по любому из пп. 1-5, в которой по существу прямолинейный участок (122a) проходит от уровня, расположенного не более чем на 30%, предпочтительно не более чем на 20% от высоты (h) лопатки от хвостовика (113) лопатки.

7. Лопатка по любому из пп. 1-6, в которой проекция на радиальную плоскость 35 линии, проходящей через центры тяжести каждого тангенциального сечения (115) лопатки (110), имеет в периферийном участке (112b) лопатки второй участок (122b), который по существу является прямолинейным, и который проходит предпочтительно от уровня, расположенного не более чем на 90% от высоты (h) лопатки от хвостовика (113) лопатки.

40 8. Лопатка по п. 7, в которой проекция на радиальную плоскость линии, проходящей через центры тяжести каждого тангенциального сечения (115) лопатки (110), поворачивает более чем на 90° на менее чем 20% от высоты (h) лопатки.

9. Лопатка по любому предыдущему пункту, в которой разница между 45 тангенциальными координатами (yG) центра тяжести сечения лопатки, расположенного на вершине лопатки, с одной стороны, и центра тяжести сечения лопатки, расположенного на границе между промежуточным участком (212a) и периферийным участком (212b), с другой стороны, лежит в диапазоне от 100% до 150%, предпочтительно в диапазоне от 110% до 140% разницы между тангенциальными координатами (yG)

центра тяжести сечений лопатки, расположенного на хвостовике лопатки, с одной стороны, и центра тяжести сечения лопатки, расположенного между промежуточным участком (212a) и периферийным участком (212b), с другой стороны.

10. Лопатка по любому предыдущему пункту, в которой толщина лопатки (112) во

⁵ всех точках составляет менее 8% от высоты (h) лопатки и предпочтительно менее 6%.

11. Цельный диск с лопатками, содержащий множество лопаток (112) по любому предыдущему пункту.

12. Ротор, имеющий множество лопаток (112) по любому из пп. 1-10.

13. Турбомашина, включающая в себя диск по п. 11 или ротор по п. 12.

10

15

20

25

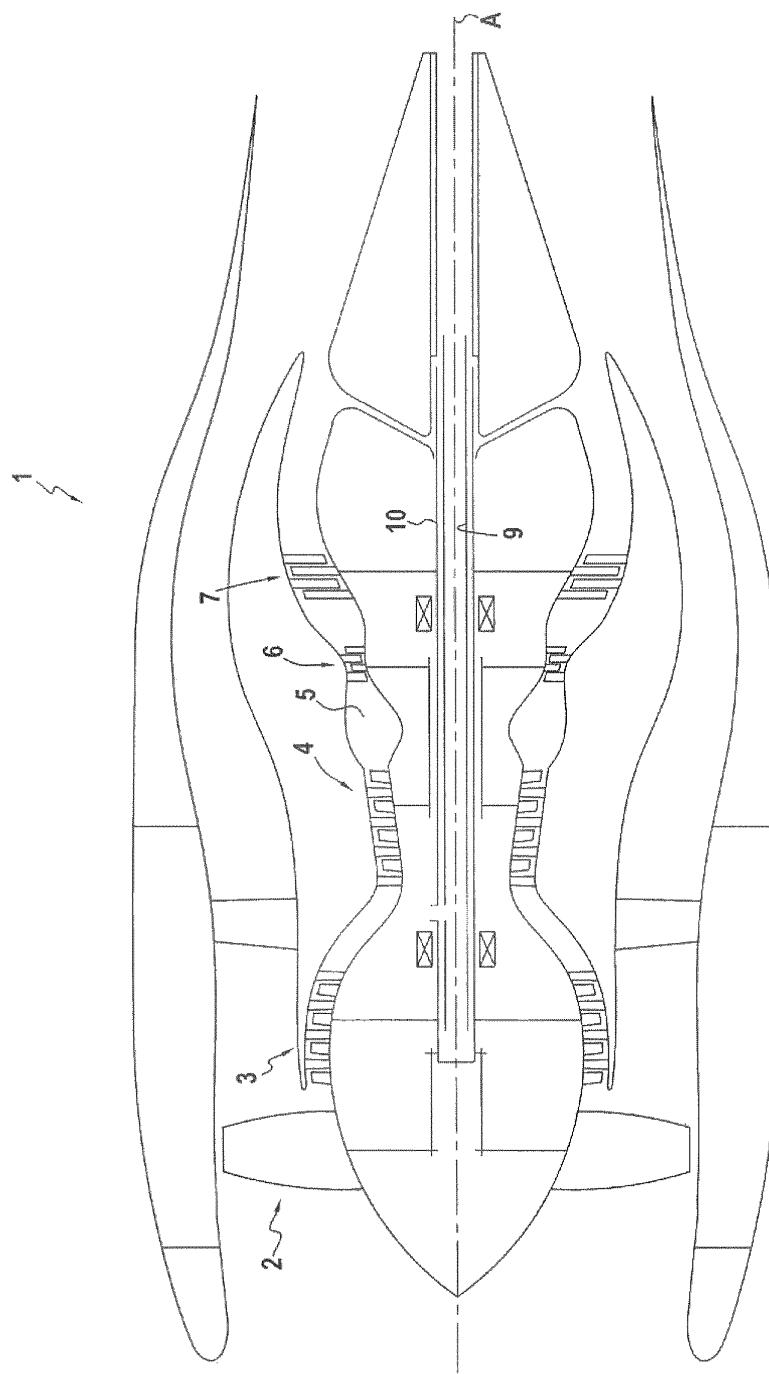
30

35

40

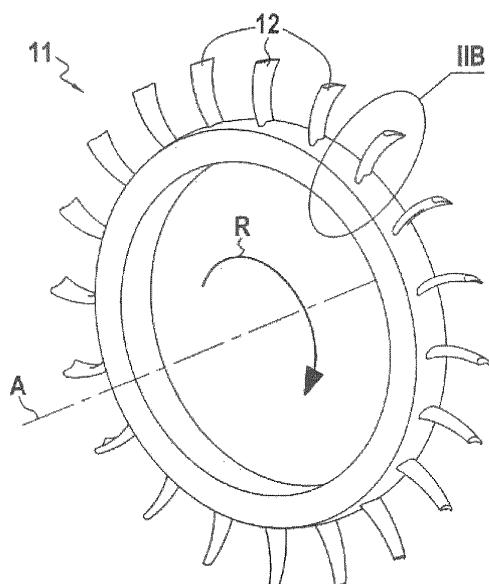
45

1/9

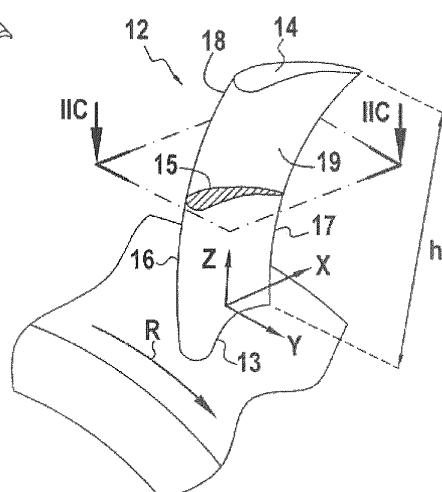


ФИГ. 1

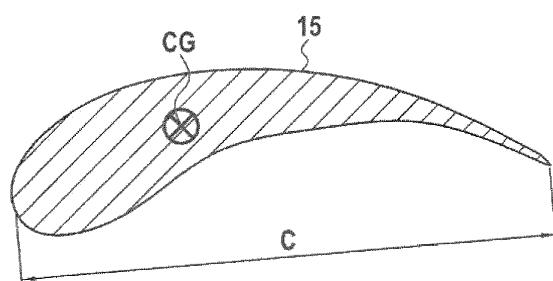
2/9



ФИГ. 2А

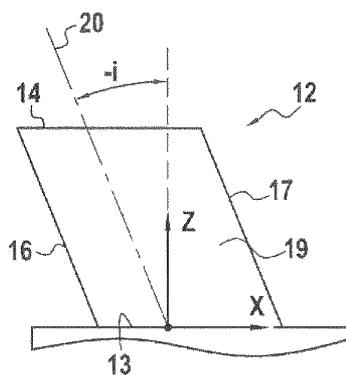


ФИГ. 2В

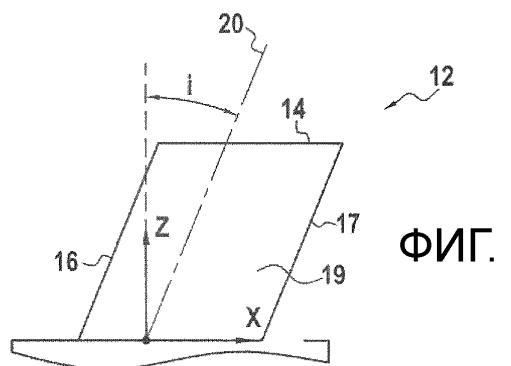


ФИГ. 2С

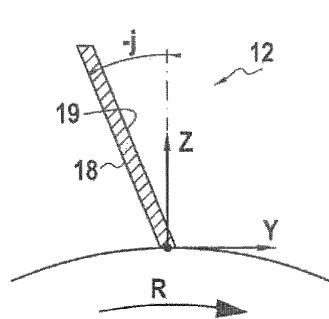
3/9



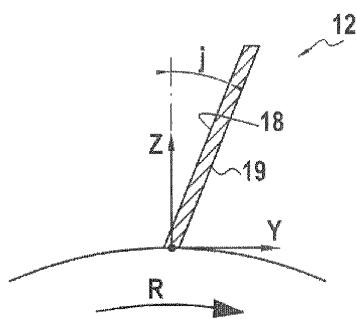
ФИГ. 3А



ФИГ. 3В

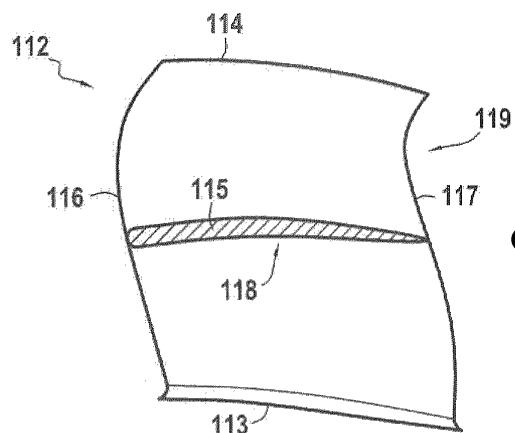


ФИГ. 3С

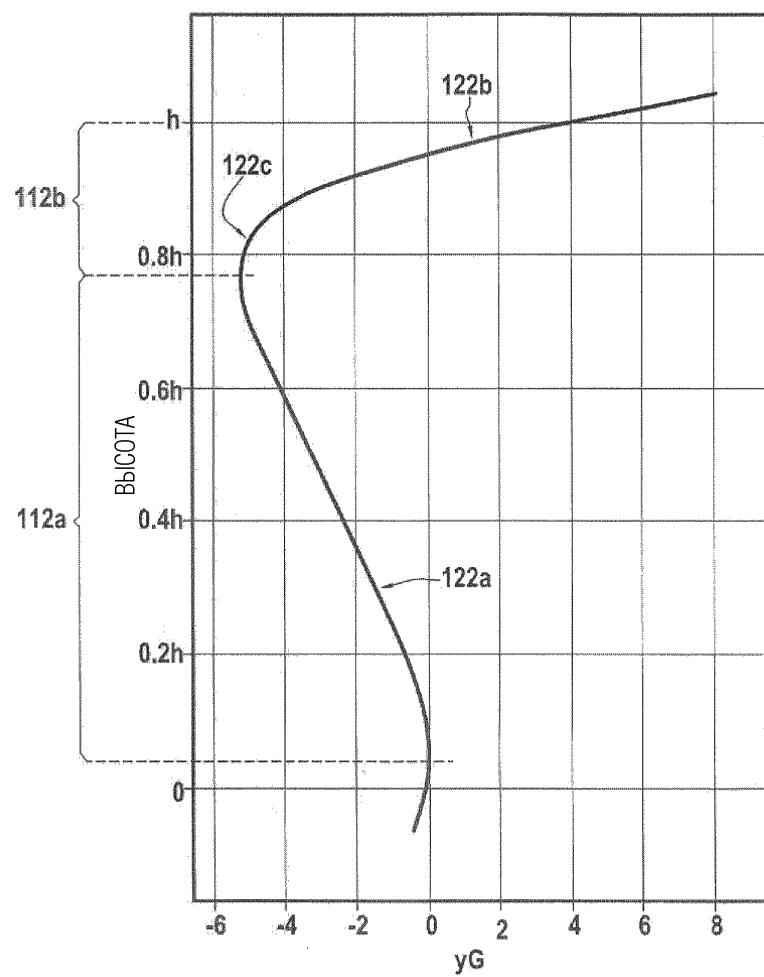


ФИГ. 3Д

4/9

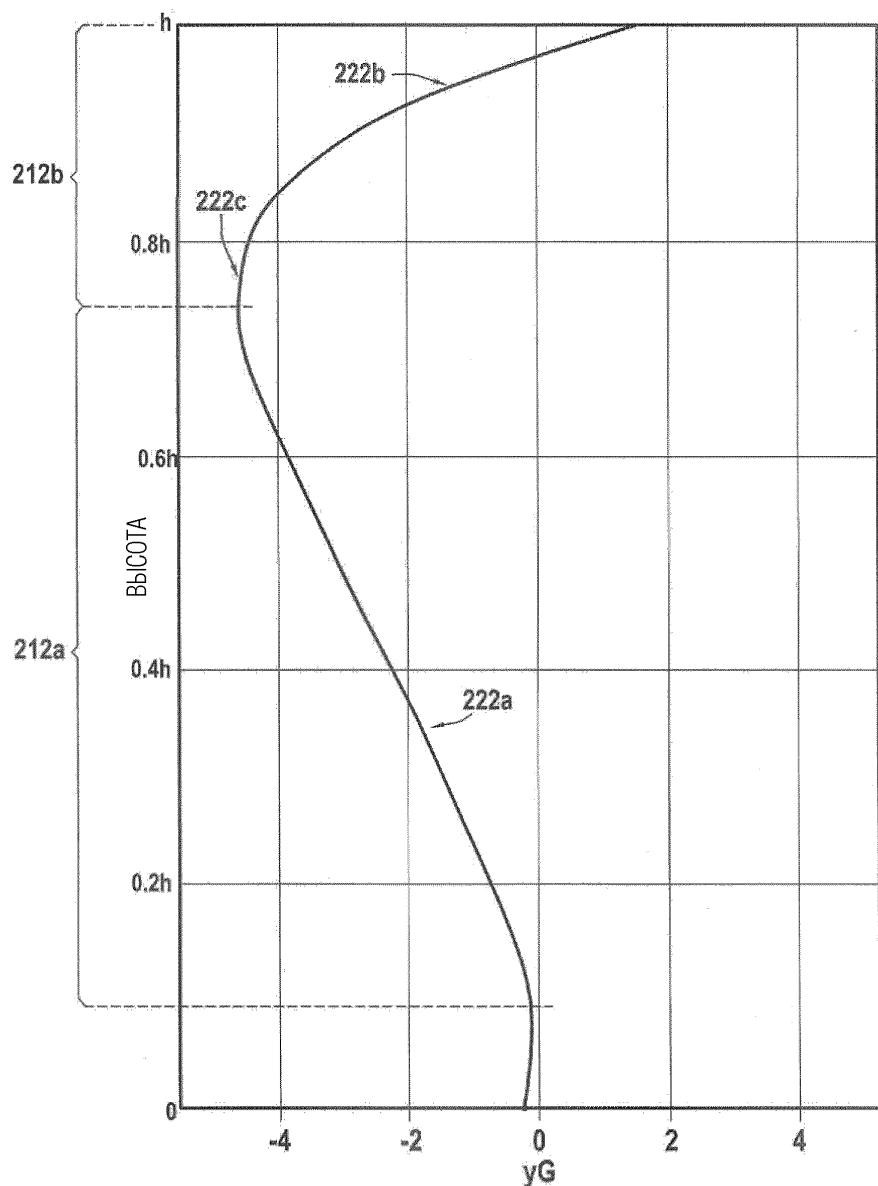


ФИГ. 4



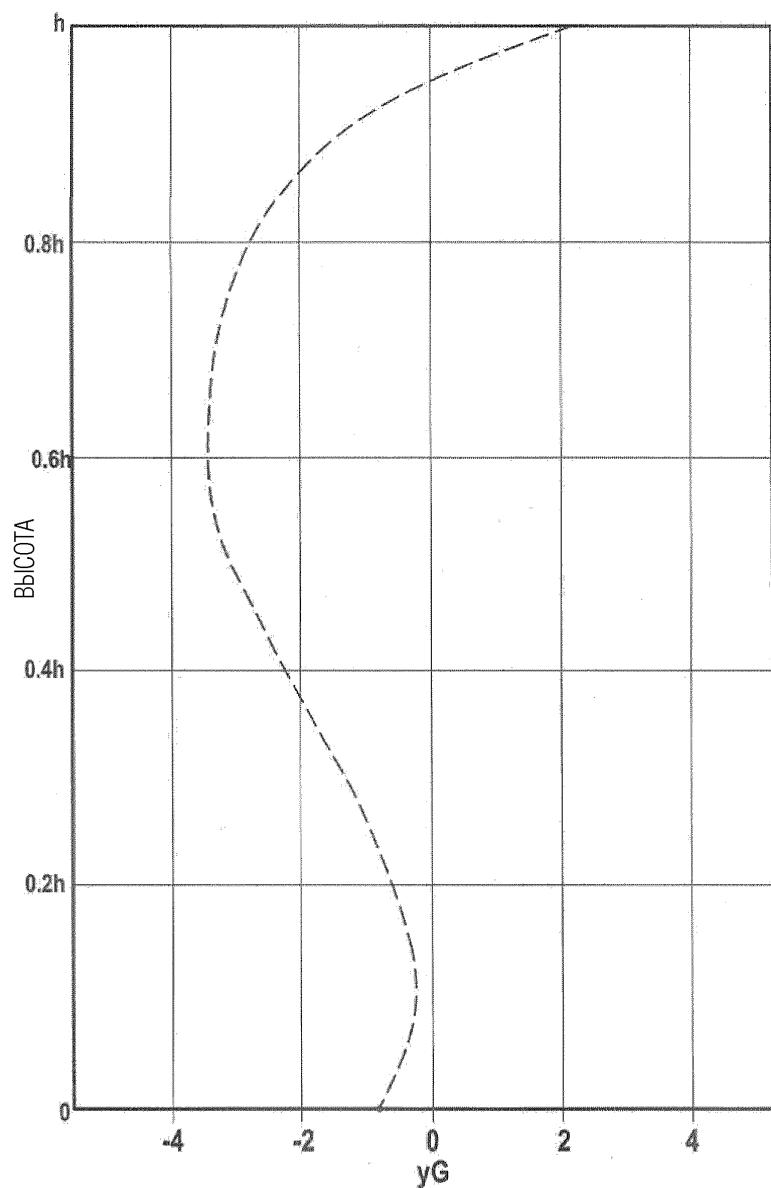
ФИГ. 5

5/9



ФИГ. 6

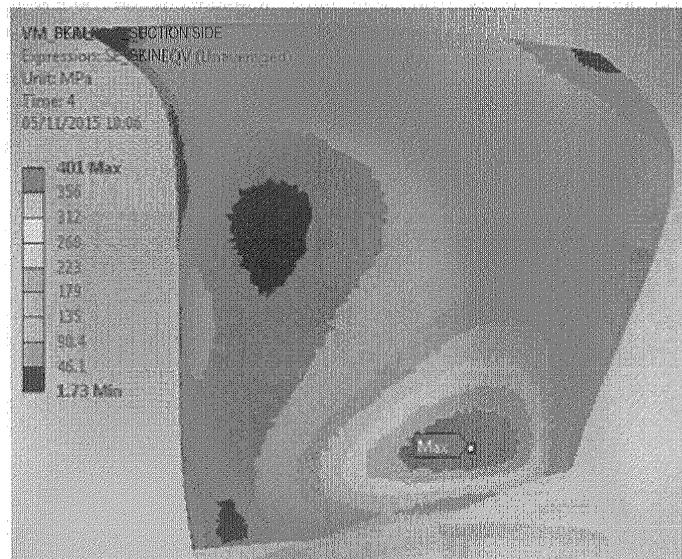
6/9



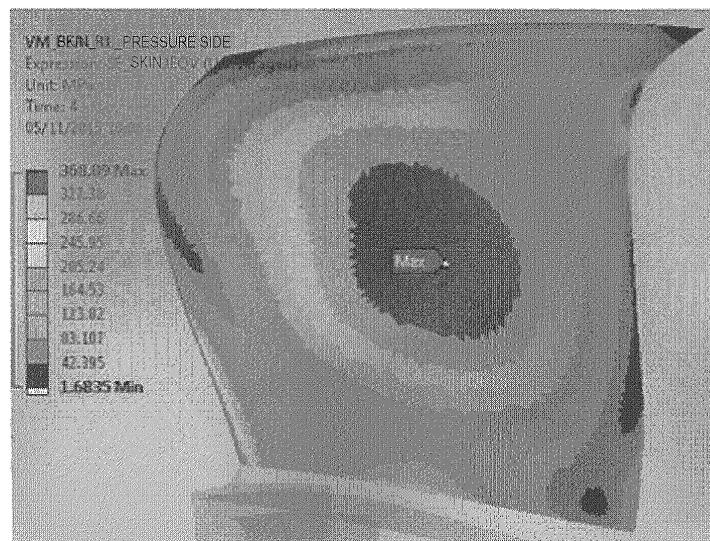
ФИГ. 7

ИЗВЕСТНЫЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

7/9

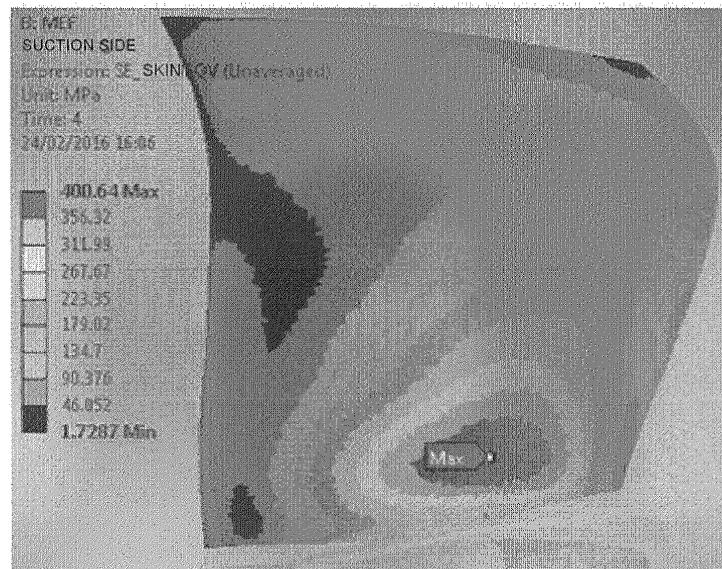


ФИГ. 8А

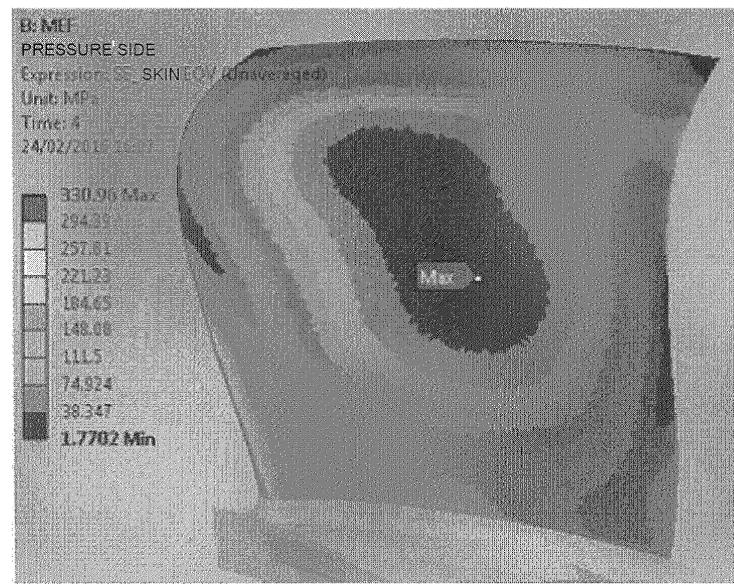


ФИГ. 8В

8/9

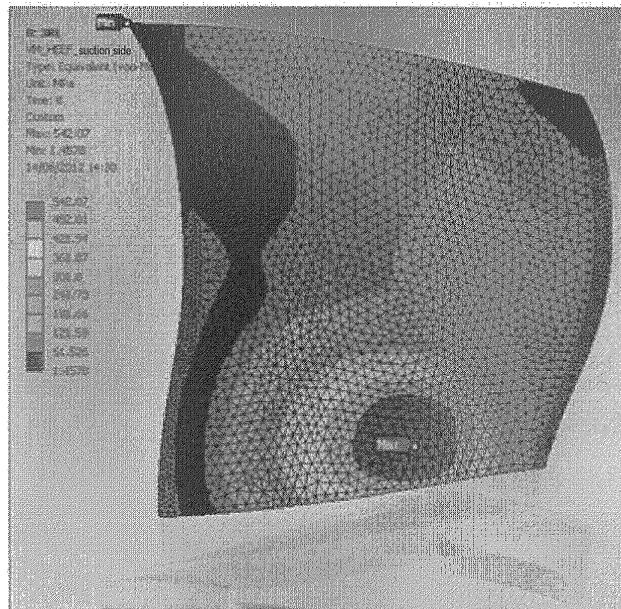


ФИГ. 9А

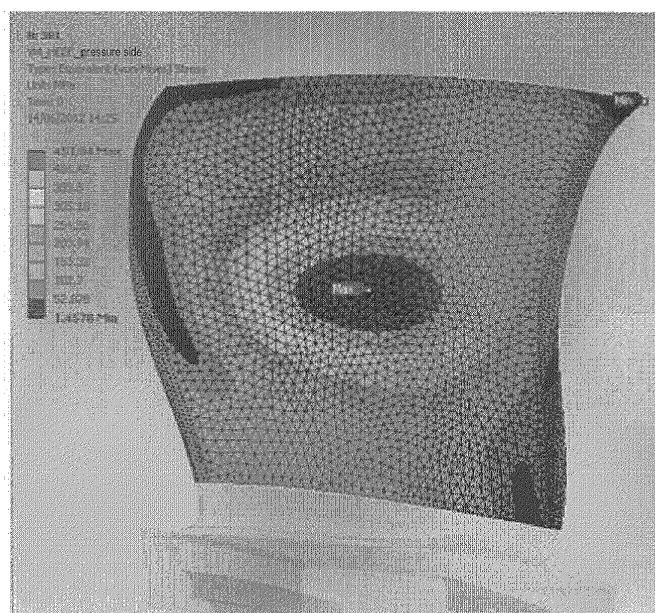


ФИГ. 9В

9/9



ФИГ. 10А



ФИГ. 10В