



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2003133190/06, 12.11.2003

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.11.2003

(30) Конвенционный приоритет:
13.11.2002 US 10/065,727

(43) Дата публикации заявки: 27.04.2005

(45) Опубликовано: 27.05.2009 Бюл. № 15

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2053373 C1, 27.01.1996. US 3885891 A,
27.05.1975. US 2812636 A, 12.11.1957. SU
775355 A, 30.10.1980. SU 1321847 A, 07.07.1987.
US 3690786 A, 12.09.1972.

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

(72) Автор(ы):

ГРАЦИОЗИ Паоло (US),
УОРРЕН Ричард Эдвин Мл. (US),
ФРИК Томас Фрэнк (US),
МАНИ Рамани (US),
ХОФЕР Дуглас Карл (US)

(73) Патентообладатель(и):

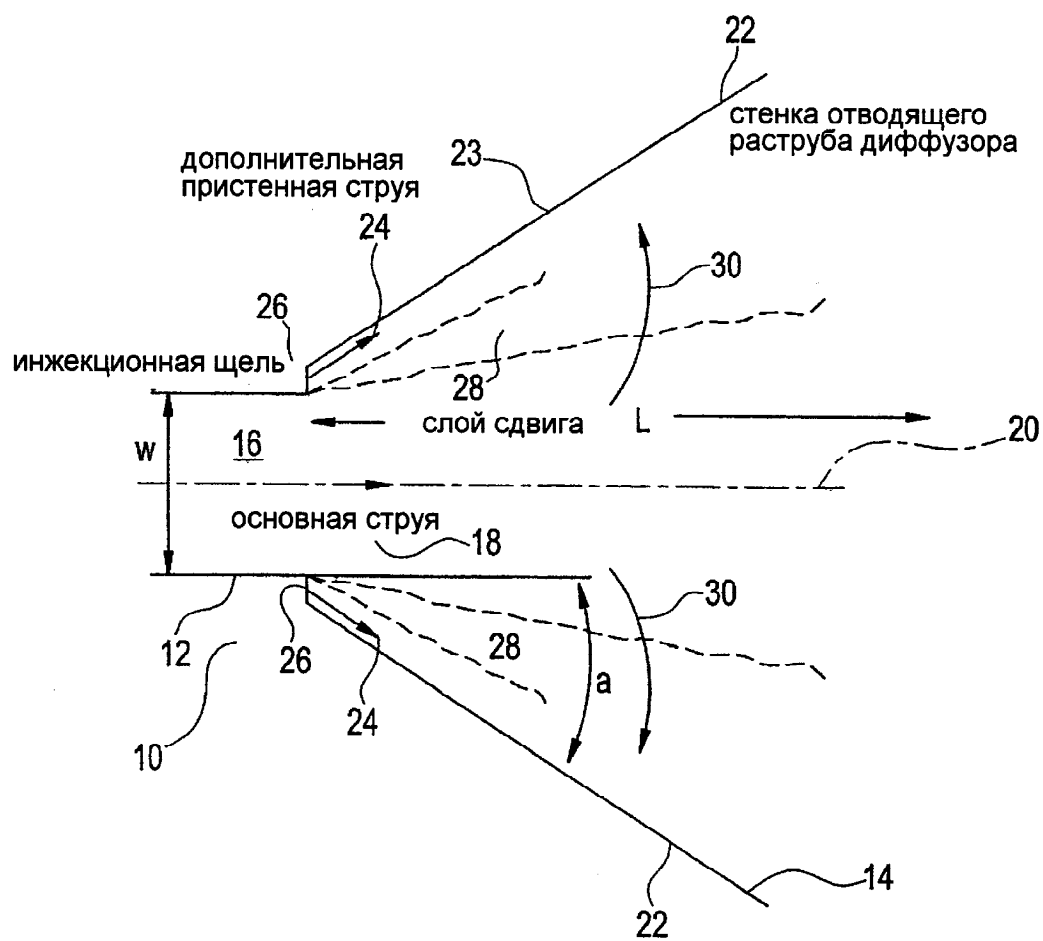
ДЖЕНЕРАЛ ЭЛЕКТРИК КОМПАНИ (US)

(54) ДИФфуЗОР, ИМЕЮЩИЙ ВОЗМОЖНОСТЬ СТРУЙНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

(57) Реферат:

Диффузор, имеющий возможность струйного исполнительного регулирования, содержит продольную ось, вход диффузора, отводящий раструб, имеющий стенку диффузора, проем в стенке диффузора, расположенный вблизи входа диффузора, криволинейный канал, расположенный вблизи проема, и независимый вспомогательный компрессорный узел. Независимый вспомогательный компрессорный узел подсоединен к криволинейному каналу. Криволинейный канал искривлен выпукло относительно продольной оси и предназначен

для введения дополнительной струи в проем вдоль стенки диффузора для поддержания дополнительной струи вдоль этой стенки с использованием эффекта флотации. Криволинейный канал и проем выполнены с возможностью введения дополнительной струи через проем под контролируемые, для обеспечения максимальной эффективности диффузора, первым углом относительно стенки диффузора и вторым углом относительно основного потока, проходящего вдоль продольной оси диффузора. Изобретение позволяет повысить эффективность диффузора. 7 з.п. ф-лы, 26 ил.



ФИГ. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21), (22) Application: **2003133190/06, 12.11.2003**(24) Effective date for property rights:
12.11.2003(30) Priority:
13.11.2002 US 10/065,727(43) Application published: **27.04.2005**(45) Date of publication: **27.05.2009 Bull. 15**

Mail address:

**129090, Moskva, ul. B.Spasskaja, 25, str. 3, OOO
"Juridicheskaja firma Gorodisskij i Partnery",
pat.pov. S.A.Dorofeevu**

(72) Inventor(s):

**GRATsIOZI Paolo (US),
UORREN Richard Ehdvin Ml. (US),
FRIK Tomas Frehnik (US),
MANI Ramani (US),
KhOFER Duglas Karl (US)**

(73) Proprietor(s):

DZhENERAL EhLEKTRIK KOMPANI (US)

(54) DIFFUSER HAVING POSSIBILITY OF JET EXECUTIVE CONTROL

(57) Abstract:

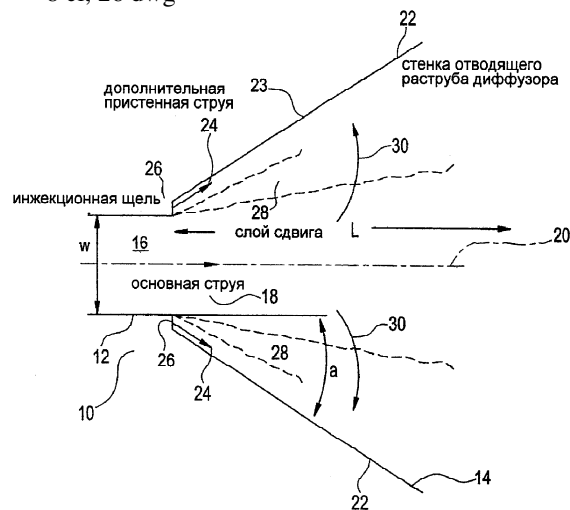
FIELD: machine building.

SUBSTANCE: diffuser having possibility of jet executive control comprises longitudinal axis, diffuser inlet, diversion socket having diffuser wall, opening in diffuser wall located near diffuser inlet, curvilinear channel located near opening and independent auxiliary compressor unit. Independent auxiliary compressor unit is connected to curvilinear channel. Curvilinear channel is curved convexly relative to longitudinal axis and is intended for introduction of additional jet in opening along diffuser wall for maintenance of additional jet along this wall with application of floatation effect. Curvilinear channel and opening are arranged with the possibility of additional jet introduction via opening at controlled first angle relative to diffuser wall and second angle relative to axial flow passing along diffuser longitudinal axis, for

provision of maximum efficiency of diffuser.

EFFECT: increased efficiency of diffuser.

8 cl, 26 dwg



ФИГ. 1

Настоящее изобретение относится к схеме струйного исполнительного регулирования, а конкретно к диффузору, имеющему возможность струйного исполнительного регулирования для обеспечения улучшенной рабочей характеристики диффузора.

Обычно максимальное отношение выходной и входной площадей выхлопного диффузора газовой турбины (а значит и глубина эффективной диффузии потока, выходящего из последней ступени турбины) ограничено соображениями отрыва потока и/или допустимой осевой длины диффузора. Диффузор демонстрирует оторванный поток, если расширение будет слишком быстрым (большой угол диффузора) или отношение площадей диффузора будет слишком большим.

Для некоторой заданной длины диффузора отношение площадей определяется углом расширения диффузора. Максимальный прилежащий угол, который может быть допустимым перед наступлением существенного отрыва потока, обычно составляет порядка десяти градусов. Для диффузоров, длина которых не ограничена, максимальное отношение площадей, которое может быть допустимым перед наступлением существенного отрыва потока, в общем случае составляет порядка 2,4 (это частное от деления выходной площади на входную площадь). Для присоединяемого потока восстановление давления является функцией отношения площадей и увеличивается с увеличением этого отношения площадей. В случае выхлопных систем турбин любое ограничение, накладываемое на отношение площадей выхлопного диффузора, накладывает ограничение на максимальное количество работы, которая может быть получена от турбины.

Конструкция, которая допускала бы увеличенные углы диффузии без отрыва потока в пределах той же самой или меньшей осевой длины, могла бы обеспечить увеличенные отношения площадей, улучшенное восстановление давления и повышенный КПД газовой турбины. В случае систем, которые уже имеют приемлемое восстановление давления, результатом могла бы стать значительно уменьшенная длина диффузора. В настоящее время выхлопная диффузионная система на газовой турбине F-класса занимает приблизительно половину габаритной длины газовой турбины.

И, наконец, рабочая характеристика диффузора, поскольку она связана с восстановлением давления, в значительной степени зависит от профиля потока на входе диффузора. В случае типичной газовой турбины F-класса профиль потока на входе изменяется как функция нагрузки машины и количества вырабатываемой мощности. Диффузоры турбин конструируют с обеспечением возможности достижения наивысшего восстановления давления в рабочих условиях полной нагрузки. В условиях частичной нагрузки, ввиду возникающих непредусмотренных профилей потока на входе и происходящих в результате этого отрывов потока, восстановление давления диффузора может ухудшаться с коэффициентом, равным трем.

Аналогично, на выхлопную систему паровой турбины накладываются геометрические ограничения, а также ограничения, обусловленные соображениями отрыва потока. Например, осевую длину колпака с нисходящим потоком нельзя увеличить без изменения несущего пролета ротора машины, а максимальное отношение площадей, допускаемое по направляющему проточному каналу пара перед тем как происходит отрыв потока, дает низкое значение коэффициента восстановления - 0,3 для всего выхлопного колпака. Для одного типа осевого диффузора, используемого в газовых турбинах, максимальный прилежащий угол,

который может быть допустимым перед тем, как происходит существенный отрыв (и потери), составляет порядка 10-15 градусов. Это соображение, наряду с ограничениями, накладываемыми на длину диффузора, ограничивает коэффициент восстановления давления в выхлопной системе величиной 0,25-0,3.

Разработанные ранее варианты, которые считаются улучшающими рабочую характеристику диффузора по сравнению с обычными конструкциями, предусматривают использование делительных лопаток, турбулизаторов и пленочных оребренных покрытий стенок, предназначенны для снижения сопротивления трения.

Недостаток делительных лопаток заключается в увеличении поверхностного трения (а значит и потерь) и надлежащей работе лишь при однородных потоках на входе.

Входное завихрение, например, может существенно ухудшить рабочую характеристику. Турбулизаторы и другие пассивные устройства нуждаются в сердцевинном потоке с большим количеством движения для подпитки пограничного слоя и задержки отрыва. В принципе они, по-видимому, не смогут привести к существенному улучшению рабочей характеристики, если (что и происходит в действительности) профиль потока на входе диффузора ниже по течению от последней ступени турбины значительно скошен и характеризуется большими областями текучей среды с малым количеством движения, находящимися в окрестности точки отрыва.

Доказательства улучшения рабочей характеристики диффузора благодаря использованию ребер и/или пленочных оребренных покрытий, предназначенных для снижения сопротивления трения, на стенках отводящего раструба диффузора являются сомнительными.

Известен диффузор, имеющий возможность струйного исполнительного регулирования и содержащий продольную ось, вход диффузора, отводящий раструб, имеющий стенку диффузора, проем в стенке диффузора, расположенный вблизи входа диффузора, и криволинейный канал, расположенный вблизи проема, искривленный выпукло относительно продольной оси и предназначенный для введения дополнительной струи в проем вдоль стенки диффузора для поддержания дополнительной струи вдоль этой стенки с использованием эффекта флотации (см., например, патент России 2053373 от 27.01.1996).

Однако данный диффузор не обеспечивает достаточного улучшения рабочей характеристики диффузора.

Задачей настоящего изобретения является улучшение рабочей характеристики диффузора, имеющего возможность струйного исполнительного регулирования.

Согласно изобретению создан диффузор, имеющий возможность струйного исполнительного регулирования и содержащий продольную ось, вход диффузора, имеющий ширину, отводящий раструб, имеющий стенку диффузора, проем в стенке диффузора, расположенный вблизи входа диффузора, и криволинейный канал, расположенный вблизи проема, искривленный выпукло относительно продольной оси и предназначенный для введения дополнительной струи в проем вдоль стенки диффузора для поддержания дополнительной струи вдоль этой стенки с использованием эффекта флотации, и независимый вспомогательный компрессорный узел, подсоединенный к криволинейному каналу, при этом криволинейный канал и проем выполнены с возможностью введения дополнительной струи через проем под контролируемыми, для обеспечения максимальной эффективности диффузора, первым углом относительно стенки диффузора и вторым углом относительно основного потока, проходящего вдоль продольной оси диффузора.

Диффузор может содержать множество проемов, распределенных по окружности

стенки диффузора.

Диффузор может иметь осевую часть, расположенную внутри диффузора и имеющую проем для дополнительной инъекции текучей среды в диффузор.

Множество проемов в стенке диффузора могут быть распределены равномерно.

Диффузор может дополнительно содержать кольцевой коллектор, установленный вокруг окружности внешнего корпуса диффузора, собирающий текучую среду из внешнего источника и распределяющий эту текучую среду в проемы в стенке диффузора.

Проем в стенке диффузора может быть круглым проемом, имеющим диаметр от 0,02 до 0,05 ширины входа диффузора, или кольцевой щелью, имеющей высоту от 0,015 до 0,02 ширины входа диффузора.

Диффузор может дополнительно содержать воздуховод, направляющий воздух из турбины, расположенной выше по течению, в криволинейный канал.

Вышеописанные и другие признаки и преимущества настоящего изобретения станут очевидными и понятными специалистам в данной области техники после изучения нижеследующего подробного описания и чертежей, на которых показано следующее:

фиг.1 показывает схему двухмерного диффузора со струйным исполнительным регулированием (продувкой на входе);

фиг.2 показывает эпюру осевой скорости, полученную посредством компьютерного моделирования двухмерного диффузора без струйного исполнительного регулирования;

фиг.3 показывает эпюру осевой скорости, полученную посредством компьютерного моделирования двухмерного диффузора со струйным исполнительным регулированием (продувкой на входе);

фиг.4 показывает график зависимости восстановления давления от отношения массовых расходов при инъекции для двухмерного диффузора;

фиг.5 показывает схему выхлопного диффузора для газотурбинного двигателя;

фиг.6 показывает график двух распределений полного давления на входе, используемых для исследования диффузора численными методами;

фиг.7 показывает график зависимости C_p от числа Маха для диффузора, имеющего стойки, включающий результаты экспериментального и численного моделирования;

фиг.8 показывает график зависимости C_p от числа Маха для диффузора без стоек и радиальных лопаток;

фиг.9 показывает эпюры скоростей широкоугольного (14 градусов) кольцевого диффузора при отсутствии и наличии продувки на входе;

фиг.10 показывает упрощенную схему диффузора, представленного на фиг.5;

фиг.11 показывает схему выхлопного кольцевого диффузора, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования (продувки на входе) с использованием забора воздуха из турбины;

фиг.12 показывает график зависимости параметра $W_{выигр}/W_{турб}$, %, от отношения массовых расходов, %, для диффузора, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования с использованием забора воздуха из турбины;

фиг.13 показывает схему выхлопного кольцевого диффузора, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования (продувки на входе) с использованием независимого вспомогательного компрессора в качестве источника продувки;

фиг.14 показывает график зависимости параметра $W_{выигр}/W_{турб}$, %, от

отношения массовых расходов, %, для диффузора, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования с использованием независимого вспомогательного компрессора в качестве источника продувки;

фиг.15 показывает схему углов, используемых для определения направления инжекции через дырки;

фиг.16 показывает схему щели/дырки для обеспечения продувки с эффектом флотации;

фиг.17 показывает схему выхлопного кольцевого диффузора, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования (продувки на входе) с использованием окружающего воздуха в качестве источника продувки;

фиг.18 показывает схему модели широкоугольного двухмерного диффузора с продувкой на входе;

фиг.19 показывает график зависимости измеренного значения C_p от отношения измеренных массовых расходов для модели диффузора, показанной на фиг.18;

фиг.20 показывает вид сбоку модели широкоугольного (14 градусов) кольцевого диффузора, показанного частично, в котором обеспечивается продувка на входе;

фиг.21 показывает вид сбоку модели широкоугольного (14 градусов) кольцевого диффузора, в котором обеспечивается продувка на входе;

фиг.22 показывает перспективный вид модели широкоугольного (14 градусов) кольцевого диффузора, в котором обеспечивается продувка на входе;

фиг.23 показывает установку с моделью диффузора, представленной на фиг.20-22;

фиг.24 показывает график, на котором сравниваются результаты экспериментального и компьютерного моделирования;

фиг.25 показан эскиз осевого диффузора паровой турбины, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования;

фиг.26 показывает эскиз выхлопного колпака с нисходящим потоком паровой турбины, выполненного с дополнительной возможностью струйного исполнительного регулирования.

В предложенной конструкции применяется струйное исполнительное регулирование для обеспечения возможности проектирования диффузоров турбин с одним или всеми нижеследующими признаками: при некотором заданном значении отношения площадей эта конструкция позволяет укоротить диффузоры для уменьшения их стоимости и минимизации длины турбины; при некотором заданном значении длины турбины обеспечивается увеличение угла раструба (отношения площадей) для улучшения рабочей характеристики диффузора и увеличения КПД турбины; обеспечивается возможность установки струйных исполнительных механизмов старой конструкции на существующие диффузоры для улучшения рабочей характеристики при любых рабочих условиях (например, в условиях полной нагрузки и частичной нагрузки).

Ниже показано, что за счет применения струйного исполнительного регулирования к оторванному потоку диффузора можно значительно улучшить восстановление давления выхлопного диффузора в разных рабочих условиях.

Описание схемы струйного исполнительного регулирования, предназначенной для улучшения рабочей характеристики диффузора, можно провести применительно к идеализированной геометрии двухмерного диффузора. Результаты численного моделирования потока рассматриваются ниже. Для исследуемых случаев нужно отметить, что основной поток диффузора отрывается на входе отводящего раструба основного контура ввиду большого угла диффузора.

На фиг.1 показан диффузор 10, имеющий первый конец 12 и второй конец 14. Первый конец 12 ограничивает вход 16 диффузора, который принимает основной поток 18 из газовой или паровой турбины или иного двигателя, расположенного выше по течению от первого конца 12. Хотя основной поток 18 показан проходящим вдоль продольной оси 20 диффузора 10, следует понять, что основной поток 18 заполняет всю ширину w входа 16 диффузора. Диффузор 10 также включает стенку 22 отводящего раструба диффузора, ограничивающую отводящий раструб 23. Рабочая характеристика (восстановление давления) диффузора зависит от отношения площадей поперечных сечений диффузора. Поскольку поток пограничного слоя, возникающий вдоль стенок диффузора, остается присоединенным к поверхностям стенок, большее отношение площадей приводит к улучшенному восстановлению давления. При заданной длине отношение площадей диффузора 10 определяется углом α , который стенка 22 диффузора образует с осью 20 диффузора. Кроме того, при заданном отношении площадей длина диффузора определяется углом α . Увеличение угла α при заданном отношении площадей приводит к более короткому диффузору с сопутствующими выходами в отношении стоимости. Однако в типичном случае отрыв пограничного слоя от стенок 22 диффузора вынуждает делать угол α меньше оптимального из соображений рабочей характеристики. Чтобы уменьшить размер областей отрыва и тем самым увеличить восстановление давления вдоль широкоугольного диффузора 10, осуществляют инъекцию дополнительных установившихся воздушных потоков 24 одновременно из двух малых (по сравнению с толщиной основной струи) продольных щелей 26, расположенных вдоль нижней и верхней стенок у входа 16 диффузора 10. При надлежащей конструкторской проработке инъекционных щелей 26 создаются пристенные струи 24 малой толщины, параллельные верхней и нижней стенкам 22 отводящего раструба диффузора, как показано на фиг.1. Полное давление (а значит и массовый расход и количество движения) струйных исполнительных механизмов (дополнительных потоков 24) предполагается управляемым.

Аэродинамическое взаимодействие между основным потоком 18 диффузора и дополнительными пристенными струями 24 существенно изменяет общую картину течения. Пристенные струи 24 питают слой 28 сдвига, который образуется между сердцевинным потоком и потоком рециркуляции, вызывая задержку отрыва потока как такового. Сердцевинный поток расширяется, как показано стрелкой 30, в направлении поперек потока, и достигается большее восстановление статического давления. Как будет описано ниже, уменьшение размера области отрыва и соответствующее увеличение диффузии зависит от отношения между массовой скоростью при инъекции и массовой скоростью основного потока диффузора.

Представлены результаты численного моделирования, которые доказывают, что метод струйного исполнительного регулирования с использованием дополнительных пристенных струй 24, показанных на фиг.1, обеспечивает улучшение рабочей характеристики диффузора. В качестве меры рабочей характеристики диффузора можно использовать статическое давление на входе 16 диффузора. Поскольку статическое давление на выходе диффузора обычно является фиксированным, меньшее статическое давление на выходе турбины (входе 12 диффузора) достигается путем увеличения восстановления вдоль отводящего раструба 23, а именно путем уменьшения размера областей отрыва (и соответствующих потерь) внутри диффундирующего потока или путем исключения отрыва по всему широкоугольному диффузору.

На фиг.2 показаны эпюра 40 осевой скорости и эпюра 50 статического давления для потока в двухмерном диффузоре с углом (α) 15 градусов. Хотя двухмерный диффузор не является реально воплощаемым конкретным вариантом осуществления, результаты компьютерного моделирования дают примерное представление об

5 эффективности схемы струйного исполнительного регулирования, описанной выше. Обращаясь к фиг.1 в связи с описанием частей диффузора 10, отмечаем, что высота на входе, например параметр w входа 16, составляет 2,7 дюйма, а длина L стенок 22 отводящего раструба составляет 25 дюймов для исследуемого диффузора (фиг.2-4).

10 Полное абсолютное давление основного потока 18 составляет 15,1 фунтов-сил на квадратный дюйм (фн-с/кв.д), а давление на выходе, то есть статическое давление на втором конце 14 диффузора 10, является фиксированным в атмосферных условиях (это абсолютное давление составляет 14,7 фн-с/кв.д). Большая область 42 отрыва (белая зона на эпюре, показанной на фиг.2), которая возникает на входе 16 отводящего

15 раструба 23, характеризует поток. В результате имеющейся картины 42 отрыва сердцевинный поток 44 присоединяется на верхней стенке, и восстановление давления оказывается минимальным, о чем можно судить по эпюре 50. Число Маха на входе составляет приблизительно 0,26.

20 На фиг.3 изображены эпюра 60 осевой скорости и эпюра 70 статического давления для потока диффузора с углом 15 градусов в случае инъекции дополнительной параллельной пленки (струи). Условия стагнации и статическое давление на выходе для основного потока 18 являются такими же, как при моделировании, отображенном на фиг.2. Полное абсолютное давление дополнительных пленок (например,

25 дополнительных пристенных струй 24, как показано на фиг.1) составляет 15,1 фн-с/кв.д, а высота щелей, измеренная перпендикулярно продольной оси 20, составляет 0,16 дюйма. Как явствует из фиг.3, эпюра 60 скорости не подтверждает наличие потока рециркуляции где-либо в пределах очертаний диффузора, а статическое давление во входной секции 16 диффузора гораздо меньше, чем в случае

30 инъекции пленки (фиг.2) (диапазон давления, указанный на фиг.2, является таким же, как указанный на фиг.3, для обеспечения возможности непосредственного сравнения рабочих характеристик). Эпюра 60 скорости недвусмысленно иллюстрирует аэродинамическое взаимодействие, происходящее между основным потоком 18 и

35 дополнительными струями 24: «крылья» (пристенные струи) текучей среды, движущейся с большой скоростью, возникают рядом со стенками, тогда как сердцевина основного потока расширяется в направлении поперек потока вдоль осевой линии 20. Ввиду большего восстановления давления, о чем можно судить на

40 основании эпюры 70 и на том основании, что статическое давление на выходе диффузора является фиксированным, соответствующее основному потоку 18 число Маха на входе увеличивается приблизительно до 0,55 (как и массовый расход).

Таким образом, имеется возможность манипулировать потоком с большой массовой скоростью посредством широкоугольного диффузора, осуществляя

45 инъекцию малых дополнительных воздушных потоков при полном давлении, приблизительно равному давлению стагнации основного потока 18. Важно отметить, что количество движения дополнительной струи 24 (один из принципиальных параметров, который определяет интенсивность аэродинамического взаимодействия)

50 зависит от отношения давлений от края до края щели 26 (т.е. от числа Маха для щели), а не только от давления инъекции. Поскольку общая картина потока изменяется из-за аэродинамического взаимодействия между пленками (струями) 24 и основным потоком 18, размер области отрыва уменьшается, и поэтому уменьшается статическое

давление на входе 16 отводящего раструба 23. Характерное для дополнительных струй 24 число Маха на входе увеличивается из-за большего отношения давлений от края до края щели 26 (полное давление в щели является фиксированным), как и количество движения, обусловленное инъекцией. Интересно отметить, что, судя по результатам, отображенным на фиг.3, поток в щели дросселируется (число Маха равно 1).

Параметром, важным для соображений, связанных с применением, является отношение массовых скоростей (средняя массовая скорость дополнительных струй, деленная на массовую скорость основного потока, при этом массовая скорость может быть измерена, например, в килограммах в секунду или в фунтах в час), необходимое для достижения определенного уровня рабочей характеристики диффузора.

На фиг.4 отображена зависимость параметра 102 рабочей характеристики диффузора от отношения 104 массовых скоростей (т.е. от отношения массовых расходов). Полностью присоединенный поток и большое восстановление давления достигаются для отношения $P_{статич}/P_0 < 0,85$ (т.е. для значения, расположенного ниже линии 106, показанной на фиг.4). На графике 100 также показана для справок точка 108, соответствующая нулевой инъекции (и полностью оторванному основному потоку). Восстановление давления возрастает монотонно (статическое давление на входе уменьшается при фиксированном статическом давлении на выходе и полном давлении на входе) с увеличением отношения массовых расходов. Кроме того, меньшее статическое давление на входе достигается при полном абсолютном давлении инъекции, равном 15 фн-с/кв.д, а не при полном абсолютном давлении 19 фн-с/кв.д (при фиксированной высоте щели 0,08 дюйма), что демонстрируется точками 110 и 112 соответственно. Это явно указывает на меньшую эффективность струйного исполнительного регулирования при существенном увеличении полного давления продувки. Более того, при абсолютном давлении $P_0(\text{пленки}) = 15$ фн-с/кв.д и $h = 0,08$ дюйма достигается разное восстановление давления, зависящее от начальных условий. Как показано на фиг.4, больший массовый расход при инъекции и большее восстановление давления получают, если полное абсолютное давление при инъекции сначала устанавливают на уровне 30,2 фн-с/кв.д, а потом уменьшают до 15 фн-с/кв.д, а не в случае, если полное абсолютное давление в щели, составляющее 15 фн-с/кв.д, используется на всем протяжении вычислений (что демонстрируется точками 110 и 114 на фиг.4). Возможно это является результатом аэродинамического гистерезиса, что может быть выгодно в случае, когда большое полное давление при инъекции нельзя с удобством поддерживать в течение длительного времени, но можно прикладывать в течение короткого времени при запуске.

Для улучшения рабочей характеристики выхлопного диффузора газовой турбины можно использовать дополнительную пристенную продуваемую струю 24, а также всасывание. Предлагаются агрессивные очертания диффузора, то есть больший прилегающий угол для заданной длины и более короткие диффузоры для заданного отношения площадей, в которых управление потоком, описанное выше в связи с фиг.1-4, применяется для того, чтобы предотвратить отрыв и воспользоваться потенциальным увеличением восстановления давления по сравнению с обычными конструкциями. Теперь будут описаны вопросы, связанные с источником продувки и/или всасывания и геометрией продувающих и/или всасывающих отверстий, важные для практического внедрения технологии управления потоком в кольцевые выхлопные системы наземных газовых турбин с простым циклом и комбинированным циклом.

Рабочая характеристика наземных газовых турбин часто стадает недостаточным восстановлением давления посредством выхлопной системы. В типичном случае максимальное отношение выходной и входной площадей выхлопного диффузора газовой турбины (а следовательно, и степень эффективной диффузии потока и восстановления давления после последней ступени турбины) ограничено из соображений отрыва потока и/или допустимой осевой длины диффузора. Диффузор продемонстрирует оторванный поток, если расширение будет слишком быстрым (при углах диффузора более десяти градусов) или отношение площадей диффузора будет слишком большим (более 2,4). Любое ограничение, накладываемое на отношение площадей, накладывает ограничение на максимальное количество работы, которая может быть получена от турбины.

На фиг.5, приводимой лишь в качестве примера, показан выхлопной диффузор 120, используемый в машине 7ЕА фирмы General Electric, однако должно быть ясно, что посредством предлагаемой схемы продувочного исполнительного регулирования можно наделить дополнительными возможностями и другие выхлопные системы, а конкретные примеры, приводимые в данном описании, не следует считать ограничивающими различные возможности для приложений. Геометрия выхлопной системы, показанная на фиг.5, представляет собой пример выхлопного диффузора, длина которого ограничена присутствием генератора ниже по течению.

Для рассмотрения фиг.5-9 необходимо дать следующие определения, приводимые применительно к фиг.5:

безразмерный радиус

$R_{\text{безр}} = (R - R_{\text{внутр}}) / (R_{\text{внешн}} - R_{\text{внутр}})$;

коэффициент восстановления давления (в нижеследующей формуле P - статическое давление, а P_0 - полное давление):

$C_p = (P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}) / (P_{0\text{вх}} - P_{\text{вх}})$;

полное давление при инжекции P_{0B} ;

удельный массовый расход при инжекции m_B ;

удельный массовый расход в основном потоке диффузора m ;

отношение удельных массовых расходов $m_R = m_B / m$;

высота инжекционной щели h .

На фиг.6 показан график распределения 130 полного давления на входе диффузора, на котором построена зависимость полного давления P_0 132 от безразмерного радиуса 134 $R_{\text{безр}}$. Показаны три варианта распределения потока на входе, т.е. профиль полного давления, определенный с помощью системы автоматизации конструкторской проработки потоков (САКПП, который представляет собой аппарат анализа средств проектирования для рабочих условий реальной машины 7ЕА), симметричное распределение полного давления (используемое для проверки робастности схемы по отношению к разным распределениям потока на входе) и равномерное распределение P_0 на входе.

На фиг.7 показан график 140 зависимости коэффициента C_p 142 восстановления давления (определение которого приведено выше) от числа Маха, 144, для номинального диффузора, имеющего выпуклую геометрию стоек. В число отображаемых данных включены результаты испытаний и компьютерного моделирования (расчетной динамики текучей среды, РДТС) для диффузора машины 7ЕА, представленного в рамках масштабированной модели и модели в натуральную величину («натурной» модели). Отмечено, что профиль P_0 на входе существенно влияет на рабочую характеристику диффузора. Перепады рабочей характеристики

заметны для «слабых» профилей на входе (например, профиля на входе, полученного с помощью САКПП). Аналогичным образом на фиг.8 показан график 150 зависимости (результаты РДТС) коэффициента C_p 142 от числа Маха 144 для диффузора машины 7ЕА, не имеющего стоек, радиальных лопаток на выходе и завихрения на входе. Эти графики показывают, что результаты для масштабированной модели применимы к машинам, представляемым натурными моделями и показывают робастность методики РДТС по отношению к выбору граничных условий на выходе.

При агрессивной (с увеличенным углом стенок) геометрии кольцевого диффузора инжекция струй с большими количествами движения осуществляется параллельно стенке отводящего раструба диффузора и возможна вдоль стенки осевой части для подпитки потока пограничного слоя и предотвращения отрыва. Можно проектировать диффузоры с более агрессивными формами (т.е. с увеличенным отношением площадей), результатом чего будет улучшение восстановления давления и рабочей характеристики машины. Варианты источника продуваемого воздуха включают ступени турбины, расположенный выше по течению независимый вспомогательный компрессорный узел (который может причинять меньшие неудобства из-за меньшей температуры продуваемого воздуха), ступени компрессора, расположенные выше по течению, и окружающий воздух (наибольшая выгода от последнего варианта заключается в том, что он не причиняет никаких неудобств в течение цикла двигателя).

На фиг.9 показаны эпюры скорости, построенные на основании результатов компьютерного моделирования потока, полученных с помощью модели кольцевого диффузора с углом 14 градусов. При отсутствии продувки через щели 182 (эпюра 180) (конфигурация сдвоенных щелей, высота щелей 0,035 дюйма, число Маха 0,53, симметричный профиль P_0 на входе, давление p окружающего воздуха на выходе) на рабочую характеристику диффузора негативно влияет отрыв потока от внешней стенки: C_p составляет лишь 0,65. При введении продувки через щели 182 (эпюра 184) отрыв потока от внешней стенки исключается, и C_p составляет 0,88, что соответствует увеличению коэффициента восстановления давления на 35%.

На фиг.10 показана схема выхлопного диффузора 120, представленного на фиг.5, имеющего номинальный угол 8 градусов стенки отводящего раструба (конфигурация, используемая в настоящее время на газовой турбине 7ЕА), где P_0 и T_0 обозначают полное давление и полную температуру, m - удельный массовый расход, а $P_{окр}$ - статическое давление на выходе. Ввиду ограничения по длине коэффициент восстановления составляет лишь примерно 0,5-0,6 (фиг.7, 8). Для улучшения рабочей характеристики при заданной осевой длине угол стенки отводящего раструба увеличивают от номинального значения 8 градусов до значения 14-15 градусов с соответствующим увеличением отношения площадей, как показано в усовершенствованном диффузоре 160 на фиг.11. Чтобы предотвратить отрыв, на входе диффузора по окружности внешней стенки и в осевой части можно применять продувку. Как показано на фиг.11, воздух, продуваемый на входы 162, 164, можно отводить из самой турбины 166. Турбина 166 может включать одно, два или более отверстий 168, 170, отделенных от основного выхода 172 турбины, через которые проходит основной поток. Отверстия 168, 170 могут вести к входам 162, 164 через каналы 174, 176, которые могут быть трубчатыми и изогнутыми, как показано на чертеже. Кольцевые коллекторы, расположенные вдоль окружности внешней стенки и осевой части в местах инжекции, используются для сбора и отстоя воздуха

относительно высокого давления и создания условий для равномерной продувки через входы 162, 164. Как подробнее обсуждается ниже, в качестве выхлопных отверстий 168, 170 турбины и продувочных отверстий 162, 164 на входе диффузора можно использовать одну или более кольцевых щелей или обособленных дырок, расположенных по окружности вдоль внутренней и внешней стенок. Ввиду большего отношения площадей и отсутствия оторванного потока, полное давление P_0' и полная температура T_0' в диффузоре 160 меньше, чем полное давление P_0 и полная температура T_0 номинального диффузора 120. Следовательно, имеется увеличение работы, получаемой от турбины 166.

Активные продувочные работы для условий «слабого» потока на входе диффузора - это работы, превалирующие на выходе диффузора типичной газовой турбины (фиг.6, профиль, определенный с помощью САКПП), при этом мощность продувки можно регулировать до достижения соответствия рабочим условиям реальной машины. Ухудшение рабочей характеристики во времени не происходит, а активная система управления требует нетрудоемкого технического обслуживания. Как описано в связи с фиг.11, вариант забора воздуха из турбины с активной продувкой требует проведения, главным образом, работы по отводу воздуха.

На фиг.13 показана схема усовершенствованного выхлопного диффузора 400 с углом 14 градусов, предусматривающего продувку на входе, при этом источник продувки является независимым вспомогательным компрессорным узлом 402 (например, насосом), изолированным от газовой турбины 404. Этот узел 402 можно разместить рядом с выхлопным диффузором 400 для минимизации необходимой работы по отводу воздуха и потерь потока через трубы 406, 408. Что касается инъекции вдоль стенки 410 осевой части, то трубы 406 могут проходить от местонахождения точек 412 инъекции через стойки диффузора и соединяться с выходом внешнего вспомогательного компрессорного узла 402, как на фиг.13.

Аналогично фиг.12, на фиг.14 показан график зависимости параметра $W_{выигр}/W_{турб}$, % от отношения массовых расходов, %, и на этом чертеже проведено сравнение между конкретным вариантом осуществления, предусматривающим забор воздуха из турбины, и конкретным вариантом осуществления, предусматривающим наличие независимого вспомогательного компрессорного узла.

Как показано на фиг.14, существует составляющий приблизительно 0,65% максимальный чистый выигрыш в работе, получаемой от турбины, в которой в качестве источника используется независимый вспомогательный компрессорный узел. В результате улучшенной рабочей характеристики выхлопной системы имеет место повышенная эффективная мощность газовой турбины. Результаты этого конкретного исследования, проведенного на выхлопном диффузоре машины 7ЕА, показывают, что возможно составляющее от 1% до 1,5% увеличение работы, производимой на валу генератора (увеличение кпд на 0,5 пункта в случае простого цикла), за счет вышеописанной схемы струйного исполнительного регулирования, предназначенной для выхлопного диффузора газовой турбины.

Теперь будет приведено описание геометрии инъекционных отверстий, режима инъекции (стационарного по сравнению с пульсирующим) и выбора источника продувки для применения технологии продувки на входе к выхлопным системам наземных газовых турбин.

Рассматриваются два конкретных варианта осуществления инъекционных отверстий: кольцевые щели и отдельные отверстия.

Одна или несколько кольцевых щелей у входа диффузора, проходящих вдоль части

окружности внешней стенки и осевой части, представляют собой один конкретный вариант осуществления геометрии. Предлагаемая высота h щели имеет значение от $\sim 0,015$ до $\sim 0,02 W$ (где W - высота канала на входе кольцевого диффузора, такого, как показанный на фиг.10).

Отдельные отверстия 432, через которые происходит выпуск дополнительных струй с большим количеством движения из внешней стенки 434 и осевой части 436 в область пристенного пограничного слоя на входе 438 диффузора, таком, как показанный в диффузоре 430 на фиг.15, представляют собой еще один конкретный вариант осуществления геометрии. Предлагаемый диаметр отверстия 432 находится в диапазоне от 0,02 до 0,05 W . Чтобы достичь максимальной эффективности для конкретного приложения, предусматривается управление углом 440 между осью дополнительной струи 442 и направлением 444 потока (угол 440 завихрения, обозначенный символом ϕ) и углом 446 между осью дополнительной струи 448 и локальной стенкой 434 диффузора (угол 446, обозначенный символом β). Следует отметить, что этот конкретный вариант осуществления включает случай отдельных отверстий, через которые происходит выпуск дополнительных струй по касательной к стенкам отводящего раструба диффузора в направлении оси диффузора, и случай дополнительных струй, параллельных направлению основного потока.

Для случая инъекции через щели или отверстия по касательной к стенкам 460 отводящего раструба диффузора, имеющимся в диффузоре 464, можно воспользоваться эффектом флотации, продемонстрированным на фиг.16, для поддержания дополнительных струй/пленок, сцепленных со стенками 460. Эффект флотации был описан румынским ученым Анри Коанда (Henri Coanda) в тридцатых годах двадцатого века. Этот эффект описывает тенденцию движения воздуха или других текучих сред вдоль близлежащей криволинейной или наклонной поверхности. То есть эффект флотации в общем случае применим к любой ситуации, когда тонкая высокоскоростная струя текучей среды встречается с поверхностью твердого тела и следует вдоль этой поверхности по некоторой кривой. В этом случае направление 468 выхода канала 470 щели или отверстия представляет собой кривую, выпуклую относительно канала 466 основного потока диффузора 464, для направления воздуха из коллектора 472 внешнего корпуса.

По сравнению со щелями отдельные отверстия имеют преимущество простой реализации в выхлопной системе газовой турбины. Воздух из источника продувки можно собирать в кольцевые коллекторы, установленные вокруг окружности внешнего корпуса выхлопного диффузора и в осевой части. Следовательно, для инъекции дополнительных струй в основной поток можно использовать малые круглые трубы, соединенные с коллектором. Поперечное сечение коллектора должно быть, по меньшей мере, в 15-20 раз больше, чем диаметр отверстий, во избежание инъекции с вариацией в окружном направлении. В альтернативном варианте, можно использовать малые трубы для переноса продуваемого воздуха непосредственно из источника продувки к месту инъекции в основном потоке.

Дополнительное преимущество отдельных отверстий по сравнению с окружными щелями заключается в предвидении того, что локализованные круглые струи будут способствовать созданию трехмерных возмущений в пограничном слое вдоль стенок диффузора. Это улучшит смешение и может привести к принципиальному уменьшению требуемого удельного массового расхода дополнительного воздуха и, следовательно, к увеличению эффективности схемы продувки.

До настоящего времени допускалось то, что для предотвращения отрыва в случае

геометрии выхлопного диффузора, предусматривающей большой прилежащий угол, инжектируемый поток является установившимся. Альтернативный конкретный вариант осуществления, который мог бы способствовать значительному уменьшению требуемого количества дополнительного воздуха, заключается в инъекции

5 пульсирующих пленок/струй в пограничных слоях у стенок диффузора для предотвращения отрыва. Ожидается, что применительно к задержке отрыва инъекция в неустановившемся режиме окажется более эффективной, чем в установившемся, ввиду искусственного формирования и развития когерентных структур в пограничных

10 слоях у стенок диффузора, поскольку эти структуры существенно улучшают смешение потока пограничного слоя с малым количеством движения и сердцевинного потока с большим количеством движения. Если воплощается этот конкретный вариант осуществления, то нужно учитывать такие факторы, как частота пульсации, коэффициент заполнения и амплитуда пульсаций.

15 Для переноса схемы струйного исполнительного регулирования на газовую турбину нужно выбрать источник продувки для обеспечения управления потоком на входе выхлопного диффузора. Конкретные варианты осуществления в рамках объема притязаний этого изобретения включают забор текучей среды (воздуха) из ступеней

20 турбин, расположенных выше по течению, например из последней ступени турбины, расположенной выше по течению, как показано на фиг.11, забор текучей среды (воздуха) из ступеней компрессоров, расположенных выше по течению, эксплуатацию естественного градиента статического давления между входом диффузора и

25 окружающей средой («вариант без неудобств», как показано на фиг.17) и независимый вспомогательный компрессорный узел-источник, как показано на фиг.13.

На фиг.17 показан диффузор 480, который обеспечивает ввод воздуха под давлением 482 окружающей среды из отверстия 495 в проем 484 в окрестности

30 входа 486 диффузора рядом со стенкой 488 отводящего раструба и в проем 490 рядом со стенкой 492 осевой части через отверстие 494.

Надлежащий выбор источника продувки зависит от конкретного приложения (машины с простым циклом в отличие от машины с комбинированным циклом, условий потока на входе диффузора, отношения полных давлений на пути через

35 машину, геометрической конфигурации машины), простоты реализации и результатов анализа системы, который гарантирует нахождение источника, оптимального с точки зрения баланса затрат и результатов (эффективности схемы).

На фиг.18 показана модель 200 двухмерного диффузора с прямыми стенками. Щели 202 расположены таким образом, что продуваемый воздух из коллектора 204

40 подается параллельно стенкам 206 отводящего раструба диффузора (продувочные щели, работающие в режиме флотации, как показано на фиг.16), а не параллельно продольной оси или осевой линии 208. На фиг.21 показан график зависимости измеренных значений C_p от отношения (%) измеренных массовых расходов для конкретного примера, в котором число Маха равно 0,5, а угол диффузора равен 15° .

45 Результаты этих экспериментов показывают, что коэффициент C_p восстановления давления диффузора может претерпевать увеличение величиной до 100% за счет продувки на входе 212 диффузора. При этих начальных экспериментах продувку проводили только вдоль верхней и нижней стенок 206 отводящего раструба, а не

50 вдоль прямых боковых стенок. Кроме того, обнаружено, что «неуправляемый» поток (при отсутствии продувки) отрывается на входе 212 и полностью присоединяется либо к нижней, либо к верхней стенке 206.

На фиг.20-22 показана геометрия модели 500 усовершенствованного кольцевого

диффузора, например, для газовой турбины 7ЕА с обеспечением продувки на входе. Модель 500 представляет собой модель в масштабе 1:8,1 геометрии диффузора 7ЕА в натуральную величину. В отличие от выхлопного диффузора в натуральную величину, модель 500 не снабжена опорными стойками в отводящем раструбе. Кроме того, угол стенок отводящего раструба модели составляет 14 градусов, в отличие от угла в 8 градусов для используемой в машине 7ЕА номинальной геометрии в натуральную величину.

На фиг.20 показаны раструб 502 и осевая часть 504 модели 500 кольцевого диффузора. Крестовины 506, 508 на обоих концах модели 500 используются для поддержки осевой части 504 относительно внешнего корпуса 516 модели 500. На фиг.21 и 23 показана схема всей модели 500. Внутренний радиус составляет 3,6 дюйма, а внешний радиус во входной секции 510 составляет 5,56 дюйма. Длина отводящего раструба 512 модели 500 составляет приблизительно 10 дюймов. Кольцевой коллектор 514, расположенный вокруг внешнего корпуса 516 и снабженный четырьмя входами 518 труб, используется для сбора воздуха под высоким давлением, подаваемого с помощью двух резервуаров большой вместимости и высокого давления, хотя в рамках объема притязаний, связанного с этой системой, возможно и другое количество входов труб. Воздух под высоким давлением инжектируется равномерно в основной поток диффузора, параллельно стенкам 520 отводящего раструба через кольцевую щель 521 шириной 30 мм, расположенную во входной секции 510 диффузора 500 вокруг окружности внешнего корпуса 516 (фиг.21-23). На фиг.20 показана дополнительная кольцевая щель, которая расположена приблизительно на расстоянии 2,5 дюйма ниже по течению от входной секции 510 по окружности осевой части 504 и используется для инъекции с целью предотвращения отрыва пограничного слоя от осевой части 504.

На фиг.23 показана экспериментальная установка 540, и здесь изображен коллектор 514 с четырьмя шлангами, обеспечивающими продувку воздуха в коллектор 514 через четыре входных отверстия, два из которых показаны на фиг.21 и 23. Испытания подтверждают эффективность продувки на входе при предотвращении отрыва пограничного слоя и достижении высокого восстановления давления посредством диффузора. На фиг.25 показано сравнение, между результатами экспериментов и моделирования РДТС. Относительное увеличение восстановления давления (C_p) при ненулевом отношении массовых расходов хорошо прогнозируется в соответствии с РДСТ. При отсутствии продувки на входе (нулевое отношение массовых расходов) пограничный слой отрывается от внешней стенки в окрестности входной секции, и поэтому измерения дают малое значение коэффициента восстановления давления, которое составляет 0,5. Величина смещения между двумя кривыми, представленная на фиг.24, является результатом различий в распределениях потока на входе между экспериментами и вариантами моделирования, а эти распределения, как описано выше (фиг.7), влияют на рабочую характеристику диффузора.

Хотя при описании модели 500 использованы конкретные размеры, ясно, что эти размеры приведены лишь в качестве примера и что размеры могут изменяться в соответствии с габаритами, местоположением и применением конкретного диффузора, поэтому их не нужно считать носящими ограничительный характер. В частности, хотя выше описано усовершенствование диффузора, имеющего угол в 8 градусов, путем получения диффузора с углом в 14 градусов следует понять, что можно в соответствии с вышеизложенным описанием усовершенствовать и другие диффузоры с углами

стенок отводящего раструба, отличающийся от 8-ми градусов, и что такое усовершенствование может предусматривать углы стенок, отличающиеся от 14-ти градусов.

Вышеописанная схема струйного исполнительного регулирования, применимая к газовым турбинам, применима также к выхлопным системам паровых турбин для выработки электроэнергии. Агрессивные выхлопные системы паровых турбин с высоким потенциальным восстановлением давления (большим отношением скоростей, малой осевой длиной) можно проектировать путем воплощения управления потоком (продувки/всасывания) с целью предотвращения отрыва пристенного пограничного слоя. Этот конкретный вариант осуществления связан с проработкой источника продувки/всасывания и геометрии отверстий для продувки/всасывания, которые важны для практического внедрения технологии управления потоком в осевые диффузоры паровых турбин и выхлопные колпаки с нисходящим потоком. Поскольку базовая технология является такой же, как та, которая подробно описана выше применительно к газовым турбинам, ниже будут отмечены основные различия в деталях, касающиеся практического внедрения этой технологии в выхлопную систему паровой турбины.

Осевой диффузор, показанный на фиг.25, и выхлопной колпак с нисходящим потоком, показанный на фиг.26, представляют собой два типа рассматриваемых выхлопных систем паровых турбин. При выхлопных системах обоих типов, реализация технологии продувки/всасывания имеет потенциал, гарантирующий получение конструкции, которая дает высокие показатели восстановления давления (малых энергетических потерь) в рамках геометрических ограничений, накладываемых на конфигурацию выхлопной системы. В результате, можно достичь увеличения работы, получаемой от машины.

На фиг.25 показан пример усовершенствованного осевого диффузора 300 паровой турбины. Кольцевой диффузор 300 включает осевую часть 310 и стенку 302 отводящего раструба диффузора, проходящую от входной секции 304 диффузора, которая примыкает к последней ступени 306 турбины, до плоскости 308 выхода диффузора. Основной поток 312, изображенный посредством стрелки направления потока, течет из последней ступени 306 турбины через диффузор 300 и проходит плоскость 308 выхода диффузора. Точки 314 и 311 показывают приблизительные места инжекционных/всасывающих отверстий в пограничном слое. Следует отметить, что имеются инжекционные/всасывающие отверстия 311, 314 вдоль внешней стенки 302 отводящего раструба диффузора и прямой осевой части 310. Эти инжекционные/всасывающие отверстия должны располагаться выше по течению от точки, где происходит отрыв пограничного слоя, и как раз перед этой точкой. Кроме того, инжекционное отверстие 311, предусмотренное на осевой части 310, расположено ниже по течению от инжекционного отверстия 314, предусмотренного на стенке 302 диффузора.

Для случая выхлопного колпака с нисходящим потоком, показанного на фиг.26, при геометрии, применяемой в настоящее время, имеет место очень низкое восстановление давления: для рабочих условий типичной машины C_p составляет примерно 0,3, что является показателем существенных энергетических потерь в канале, однако геометрические ограничения и отрыв потока препятствуют улучшению рабочей характеристики. Управление потоком (продувка/всасывание) гарантирует проектирование и внедрение более агрессивной геометрии, обуславливающей большее отношение площадей, выхлопного колпака с

потенциально более высоким восстановлением давления при одновременном предотвращении отрыва пограничного слоя и сопутствующих этому потерь. Поскольку наиболее значительная доля диффузии в выхлопном колпаке 330 с нисходящим потоком происходит по направляющему каналу 332 пара (фиг.26), то

5 имеющий большее отношение площадей направляющий канал пара имеет потенциал достижения большего восстановления давления, поскольку предотвращается отрыв потока. Продувку/всасывание осуществляют в месте 334, расположенном на окружности направляющего канала 332 пара около входа 336 колпака, который

10 примыкает к последней ступени 338 турбины, для подпитки/удаления пограничного слоя и предотвращения отрыва потока применительно к основному потоку 342. Ввиду конической формы осевой части 340 инжекция вдоль стенки конуса осевой части в типичном случае не требуется.

В случае осевого диффузора, показанного на фиг.25, можно применять для

15 обеспечения надлежащей геометрии отверстий осевые пазы или обособленные дырки аналогично случаю кольцевого выхлопного диффузора газовой турбины, описанного выше.

Вблизи входа 304 диффузора расположена одна или несколько кольцевых щелей, проходящих по окружности внешней стенки 302 и осевой части 310. Предложенная

20 высота щели h составляет от $\sim 0,015$ до $\sim 0,02 W$ (где W - высота входного канала кольцевого диффузора).

Отдельные отверстия, через которые происходит выпуск дополнительных струй с большим количеством движения из внешней стенки 302 и осевой части 310 в

25 пристенные пограничные слои основного потока 312, расположены на входе 304 диффузора. Предлагаемый диаметр этих отверстий находится в диапазоне от $0,02$ до $0,05 W$. Чтобы достичь максимальной эффективности для конкретного приложения, предусмотрено управление углом между осью дополнительной струи и направлением

30 основного потока и углом между осью дополнительной струи и направлением локального наклона стенки диффузора (см. фиг.15). Следует отметить, что этот конкретный вариант осуществления включает случай отдельных отверстий, через которые происходит выпуск дополнительных струй по касательной к стенкам отводящего раструба диффузора в направлении оси диффузора, и случай

35 дополнительных струй, параллельных направлению основного потока.

Для выхлопного колпака с нисходящим потоком, такого, как показанный на фиг.26, можно использовать кольцевые щели или отдельные отверстия.

Можно использовать кольцевые щели, расположенные в окрестности входа 336

40 колпака и проходящие по части окружности направляющей 332 пара. Предлагаемая высота щели h составляет от $\sim 0,015$ до $\sim 0,02 W$ (где W - высота входного канала 336 кольцевого диффузора).

Можно также использовать отдельные отверстия, через которые происходит выпуск дополнительных струй с большим количеством движения из

45 направляющей 332 пара в пристенные пограничные слои основного потока 342 в окрестности входа 336 колпака. Предлагаемый диаметр этих дырок находится в диапазоне от $0,02$ до $0,05 W$. Чтобы достичь максимальной эффективности для конкретного приложения, предусмотрено управление углом между осью

50 дополнительной струи и направлением потока и углом между осью дополнительной струи и направлением локального наклона направляющего канала пара. Следует отметить, что этот конкретный вариант осуществления включает случай отдельных отверстий, через которые происходит выпуск дополнительных струй по касательной к

стенкам направляющего канала пара в направлении оси колпака, и случай дополнительных струй, параллельных направлению основного потока.

В случае инъекции по касательной к стенкам выхлопного диффузора или колпака можно использовать эффект флотации для поддержания дополнительных струй присоединенными к стенкам, как описано выше в связи с выхлопными диффузорами газовых турбин, такими, как показанный на фиг.16.

По сравнению со щелями отдельные отверстия имеют преимущество более простой реализации в выхлопной системе газовой турбины. Продуваемую текучую среду, поступающую из источника продувки, можно собирать в кольцевой коллектор, установленный вокруг окружности внешнего корпуса выхлопного диффузора. Для инъекции вспомогательных струй в основной поток можно использовать малые круглые трубы, соединенные с коллектором. Поперечное сечение коллектора должно быть, по меньшей мере, в 15-20 раз больше, чем диаметр дырок, во избежание инъекции с вариацией в окружном направлении. В альтернативном варианте можно использовать малые трубы для переноса продуваемого воздуха непосредственно из источника продувки к месту инъекции в основном потоке.

Дополнительное преимущество отдельных отверстий по сравнению с кольцевыми щелями заключается в предвидении того, что локализованные круглые струи будут способствовать созданию трехмерных возмущений в пограничном слое вдоль стенок диффузора. Это улучшит смешение и может привести к принципиальному уменьшению требуемого удельного массового расхода дополнительного воздуха и, следовательно, к увеличению эффективности схемы продувки.

До настоящего времени задавались допущением о том, что для предотвращения отрыва в случае геометрии выхлопного диффузора, предусматривающей большое отношение площадей, инжектируемый/всасываемый поток должен быть установившимся. Альтернативный конкретный вариант осуществления, который мог бы способствовать значительному уменьшению требуемого количества воздуха в дополнительном потоке, заключается в инъекции пульсирующих пленок/струй. Ожидается, что применительно к задержке отрыва инъекция в неустановившемся режиме окажется более эффективной, чем в установившемся, ввиду искусственного формирования и развития когерентных структур в пристенных пограничных слоях, а эти структуры существенно улучшают смешение потока пограничного слоя с малым количеством движения и сердцевинного потока с большим количеством движения. Параметры, которые скажутся на эффективности пульсирующих пленок/струй, включают частоту пульсации, коэффициент заполнения и амплитуду пульсаций.

Для переноса схемы струйного исполнительного регулирования на паровую турбину нужно уделить внимание выбору источника продувки для обеспечения управления потоком на входе выхлопного диффузора. Конкретные варианты осуществления в рамках объема этой схемы струйного исполнительного регулирования предусматривают забор пара из ступеней турбин, расположенных выше по течению, например из последней ступени турбины, расположенной выше по течению (т.е. продувку), независимый вспомогательный компрессорный узел или узел-источник вакуума (т.е. продувку или всасывание) и забор пара из выходной ступени (высокого давления) и повторную инъекцию на входной ступени (высокого давления) через замкнутого контура. В последнем варианте, при необходимости, можно увеличить полное давление потока на выходе выхлопного диффузора перед инъекцией, делая это за счет использования пароструйного насоса, приводимого в действие малым количеством пара, отбираемого из ступеней турбины,

расположенных выше по течению (т.е. за счет продувки).

Когда всасывание применяют в конденсационной паровой турбине, можно достичь стока потока при меньшем давлении за счет применения дополнительного «конденсатора всасывания», в который подается охлаждающая вода при температуре 5 меньшей, чем у основного конденсатора. Эта охлаждающая вода пониженной температуры потенциально может быть той же охлаждающей водой, которая используется для подачи в основной конденсатор, но пропущенной сначала через конденсатор всасывания, когда его температура является наименьшей, перед 10 направлением этой воды в основной конденсатор. При абсолютных давлениях, типичных для конденсационной паровой турбины, находящихся на уровне 1,5 мм рт.ст. (миллиметра ртутного столба), можно достичь отношения давлений, составляющего 1,2, между основным потоком и конденсатором всасывания при разности температур менее 10 градусов Фаренгейта (всасывание).

Надлежащий выбор источника продувки зависит от конкретного приложения (конфигурации машины, условий потока на входе выхлопного диффузора, отношения 15 полных давлений на пути через машину), простоты реализации и результатов анализа системы, который гарантирует нахождение источника, оптимального с точки зрения баланса затрат и результатов (эффективности схемы).

Для такой паровой турбины, как однопоточная турбина A10 мощностью 100 МВт с централизованным управлением, усовершенствованный осевой диффузор с продувкой/всасыванием на входе имеет потенциал для увеличения эффективной 20 мощности паровой турбины на величину до 400 кВт (или 0,4%). Эта оценка соответствует увеличению значения коэффициента C_p восстановления давления от 0,25-0,3 до 0,6.

Таким образом, это изобретение обеспечивает приложение продувки/всасывания к выхлопным системам газовых турбин и паровых турбин, проработку геометрии 30 расположения инжекционных/всасывающих отверстий и подробностей реализации, режима инъекции/всасывания (установившегося по сравнению с пульсирующим) в контексте исследуемого конкретного приложения, а также проработку различных источников продувки/всасывания.

Хотя изобретение описано со ссылками на предпочтительный конкретный вариант 35 осуществления, специалистам в данной области техники очевидно, что в него могут быть внесены различные изменения и что его элементы могут быть заменены эквивалентными в рамках объема притязаний изобретения. Кроме того, можно осуществить многие модификации для адаптации конкретной ситуации или материала к положениям изобретения в рамках его существа. Следовательно, предполагается, 40 что изобретение не сводится к конкретному варианту осуществления, описанному в качестве наилучшего варианта воплощения этого изобретения, и должно считаться включающим все конкретные варианты осуществления в рамках объема притязаний, охарактеризованного прилагаемой формулой изобретения. Кроме того, употребление 45 терминов «первый», «второй», и т.д. не обозначает какой-либо порядок, или последовательность, или важность; эти термины «первый», «второй», и т.д. используются скорее для того, чтобы отличить один элемент от другого.

Формула изобретения

50 1. Диффузор, имеющий возможность струйного исполнительного регулирования и содержащий продольную ось, вход диффузора, отводящий раструб, имеющий стенку диффузора, проем в стенке диффузора, расположенный вблизи входа диффузора, и

криволинейный канал, расположенный вблизи проема, искривленный выпукло относительно продольной оси и предназначенный для введения дополнительной струи в проем вдоль стенки диффузора для поддержания дополнительной струи вдоль этой стенки с использованием эффекта флотации, и независимый вспомогательный компрессорный узел, подсоединенный к криволинейному каналу, при этом криволинейный канал и проем выполнены с возможностью введения дополнительной струи через проем под контролируемые, для обеспечения максимальной эффективности диффузора, первым углом относительно стенки диффузора и вторым углом относительно основного потока, проходящего вдоль продольной оси диффузора.

2. Диффузор по п.1, отличающийся тем, что содержит множество проемов, распределенных по окружности стенки диффузора.

3. Диффузор по п.1, отличающийся тем, что имеет осевую часть, расположенную внутри диффузора и имеющую проем для дополнительной инъекции текучей среды в диффузор.

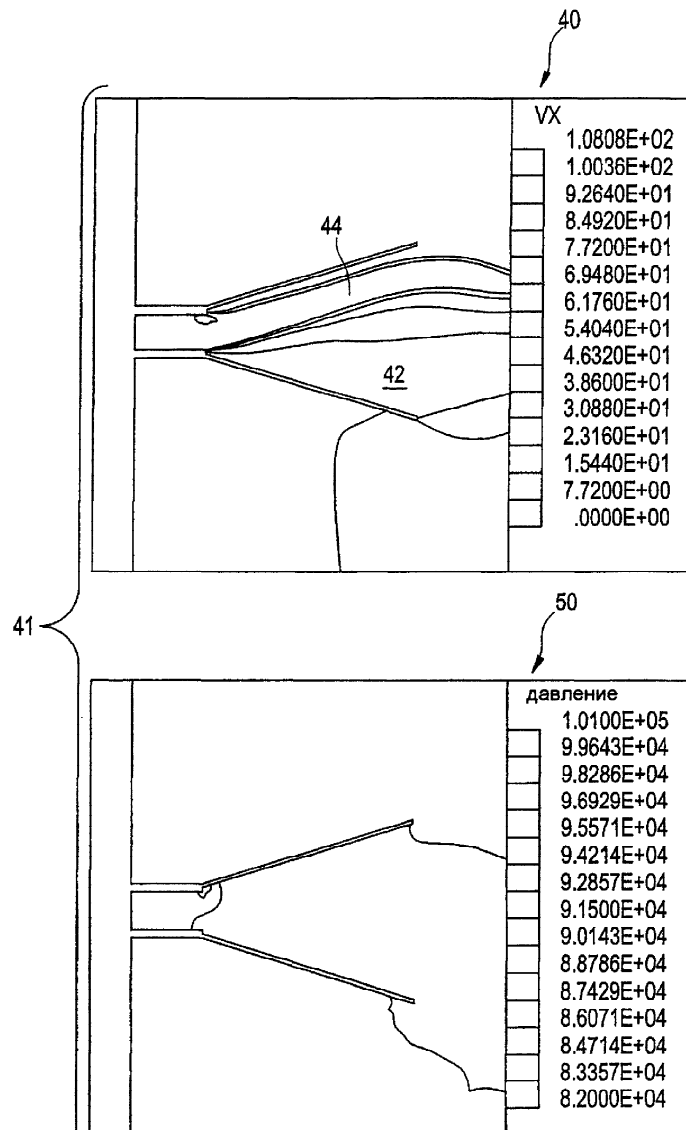
4. Диффузор по п.2, отличающийся тем, что множество проемов в стенке диффузора распределены равномерно.

5. Диффузор по п.2, отличающийся тем, что дополнительно содержит кольцевой коллектор, установленный вокруг окружности внешнего корпуса диффузора, собирающий текучую среду из внешнего источника и распределяющий эту текучую среду в проемы в стенке диффузора.

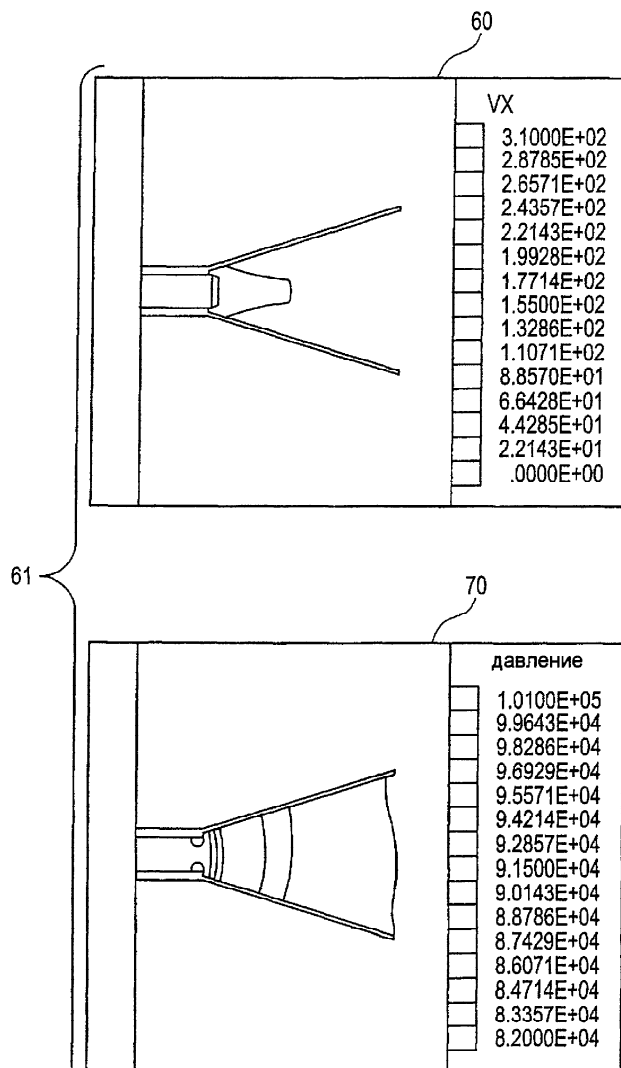
6. Диффузор по п.1, отличающийся тем, что проем в стенке диффузора является круглым проемом, имеющим диаметр от 0,02 до 0,05 ширины входа диффузора.

7. Диффузор по п.1, отличающийся тем, что проем в стенке диффузора является кольцевой щелью, имеющей высоту от 0,015 до 0,02 ширины входа диффузора.

8. Диффузор по п.1, отличающийся тем, что дополнительно содержит воздуховод, направляющий воздух из турбины, расположенной выше по течению, в криволинейный канал.

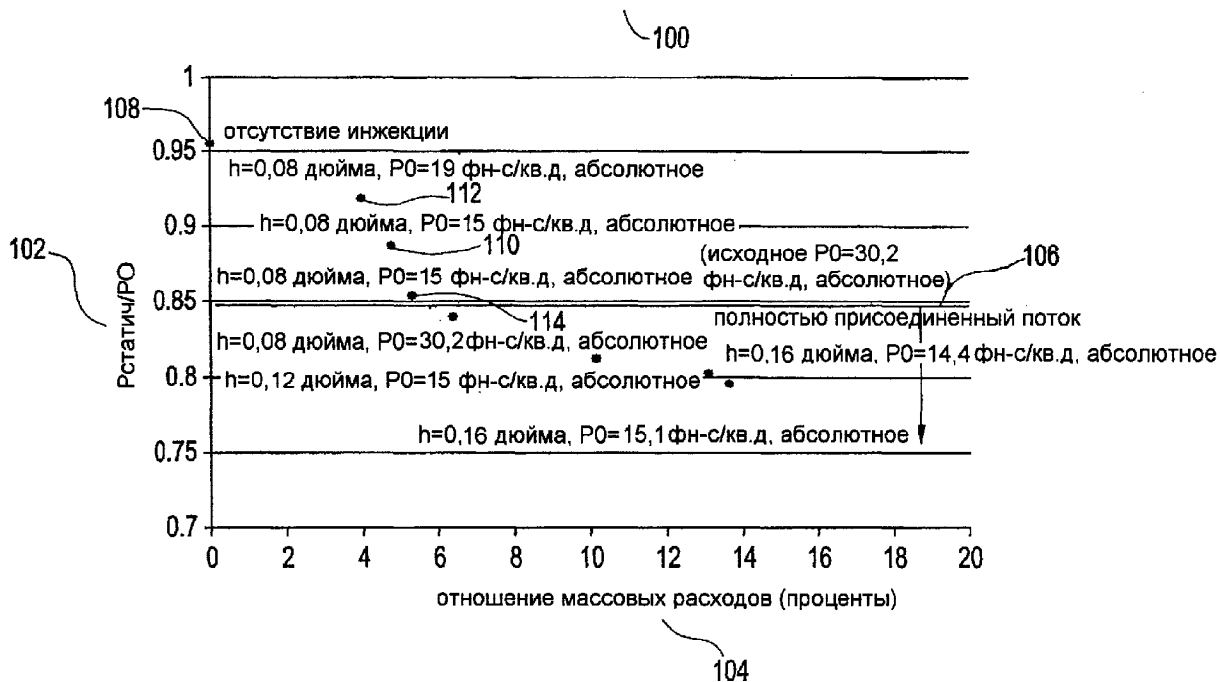


ФИГ. 2

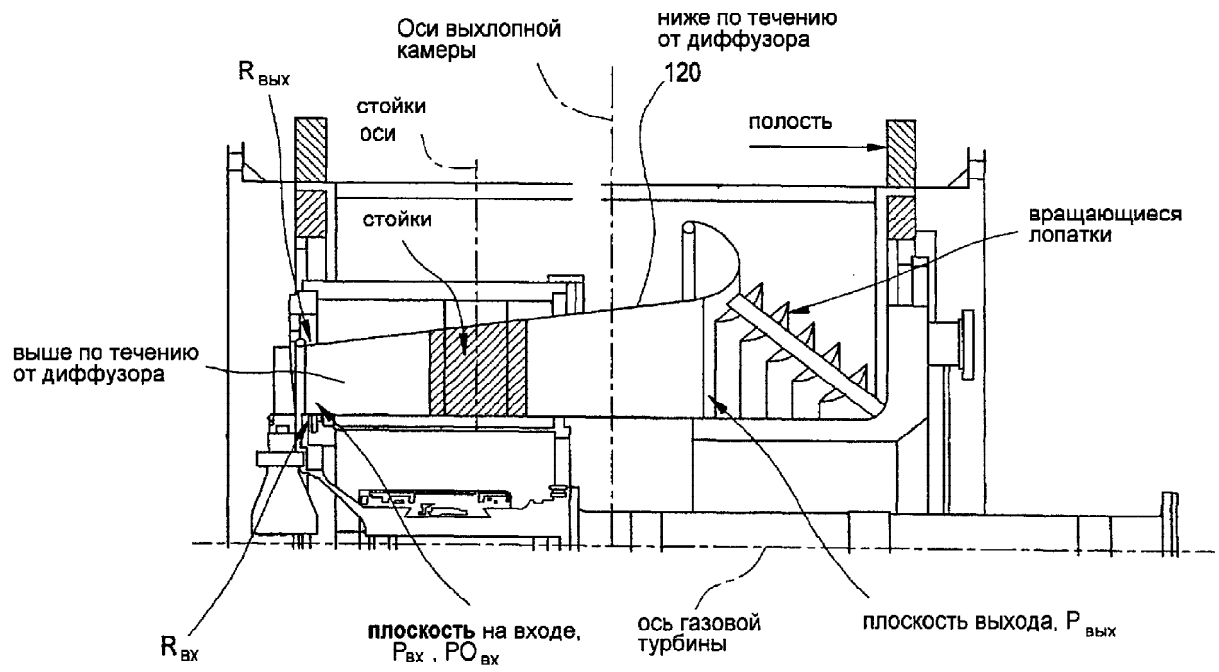


ФИГ. 3

восстановление давления

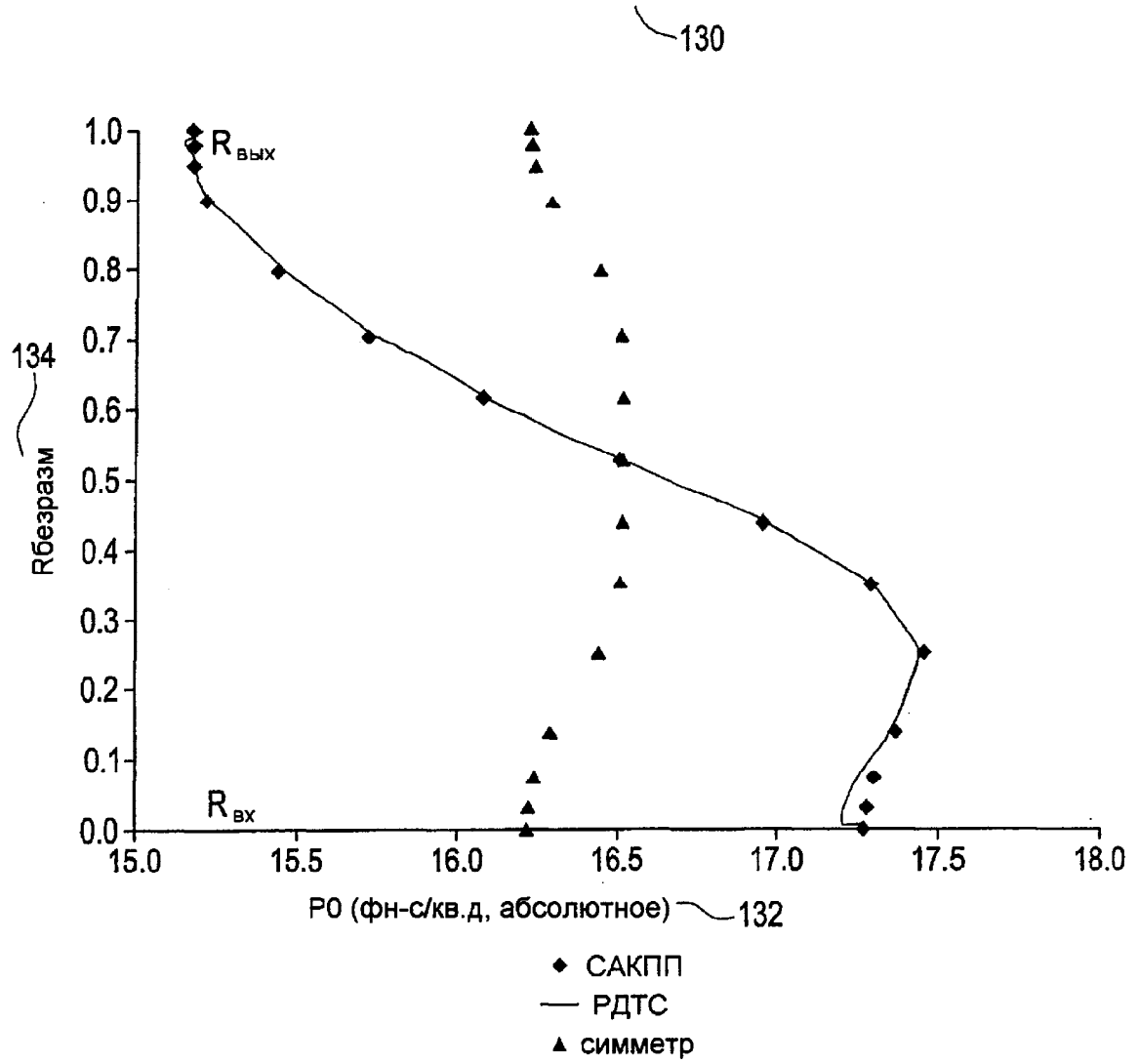


ФИГ. 4



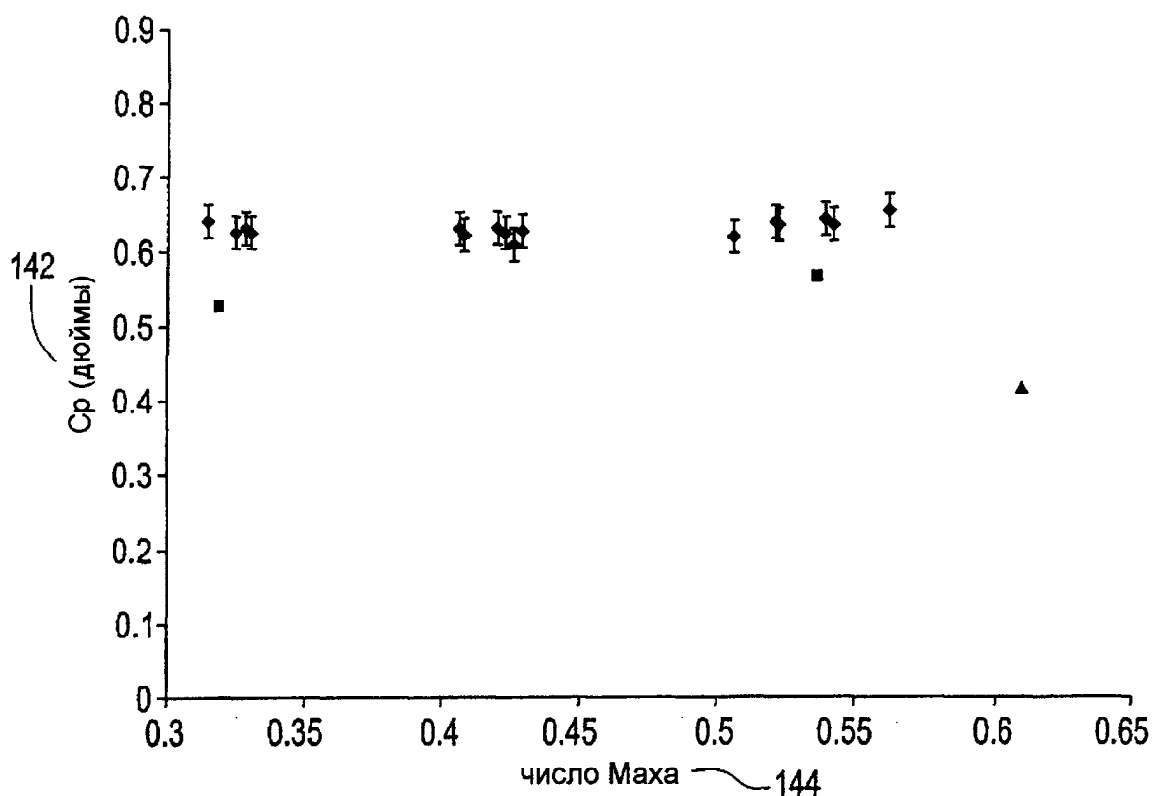
ФИГ. 5

распределение полного давления на входе



ФИГ. 6

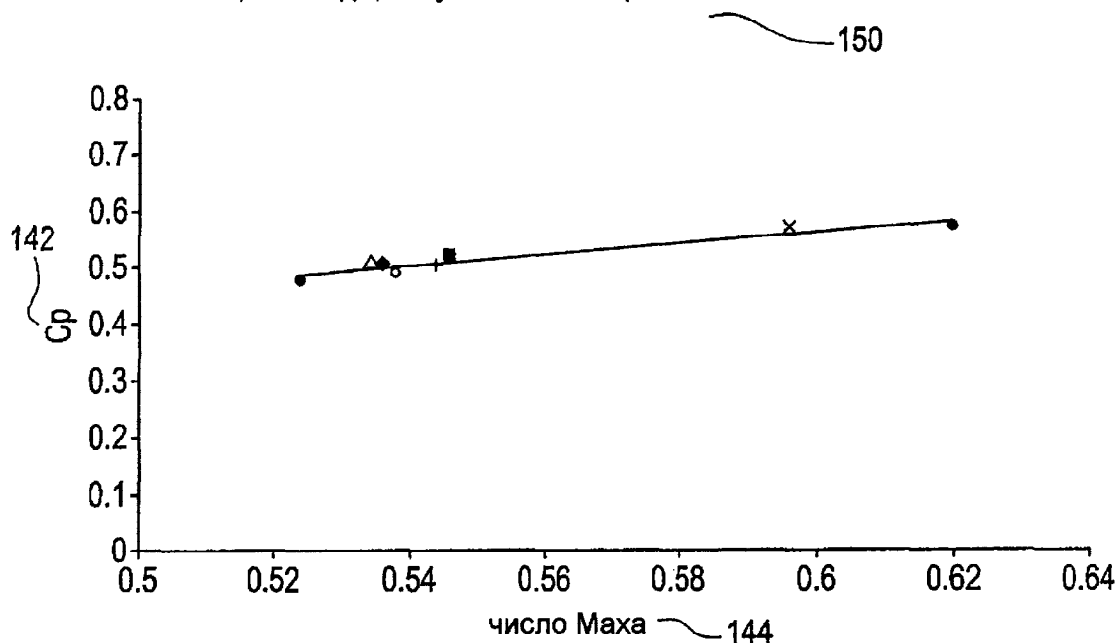
геометрия при наличии выпуклых стенок
в выхлопном диффузоре машины 7ЕА



- ◆ испытание ('81) - модель (1:7,1), T_0 окружающей среды, отсутствие завихрения на входе
- РДТС - в натуральную величину, $T_0=1461,4$ °R, отсутствие радиальных лопаток на выходе, равномерные профили на входе, отсутствие завихрения на входе
- ▲ РДТС - в натуральную величину, $T_0=1461,4$ °R, отсутствие радиальных лопаток на выходе, профили, определенные по методике САКПП, на входе, отсутствие завихрения на входе

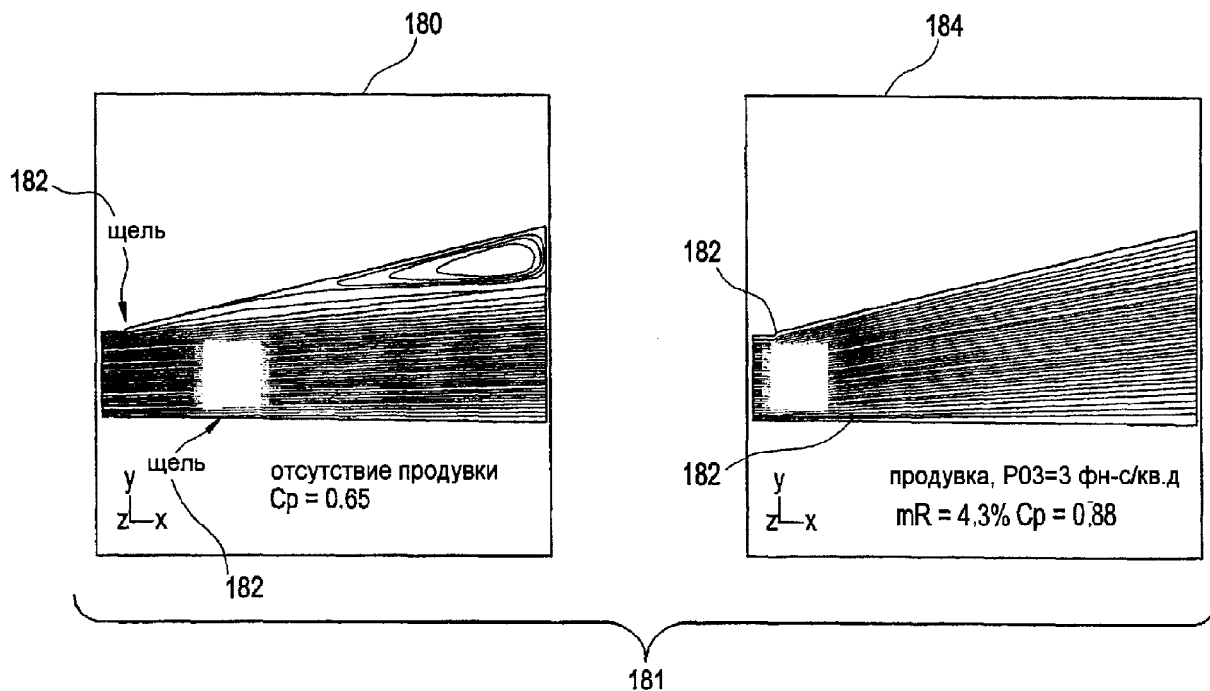
ФИГ. 7

выхлопной диффузор машины 7ЕА - отсутствие опор, отсутствие радиальных лопаток на выходе, профиль, определенный по методике САКПП, на входе, отсутствие завихрения



- ◆ в натуральную величину, m на выходе
- в натуральную величину, среднее p на выходе
- Δ в натуральную величину, m на выходе, экстраполяция для выхода
- x в натуральную величину, среднее p на выходе, экстраполяция для выхода
- модель (1:8,1), p на выходе
- модель (1:8,1), p на выходе, экстраполяция для выхода
- + модель (1:8,1), среднее p на выходе, экстраполяция для выхода

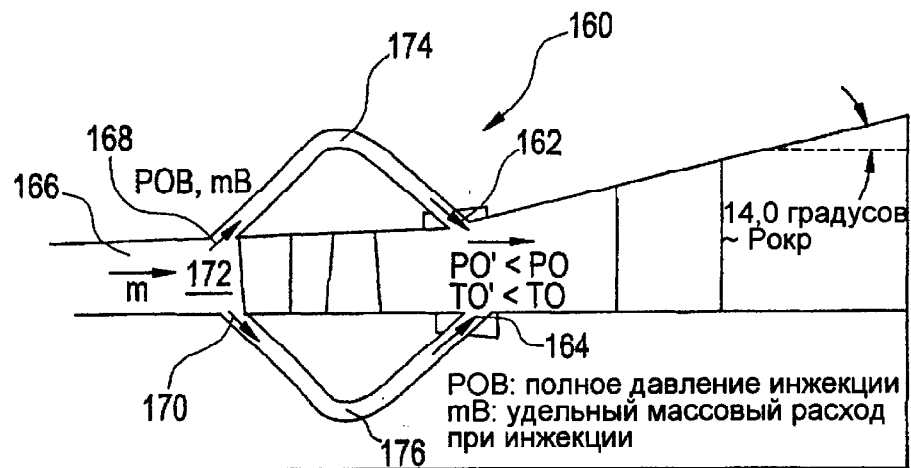
ФИГ. 8



ФИГ. 9

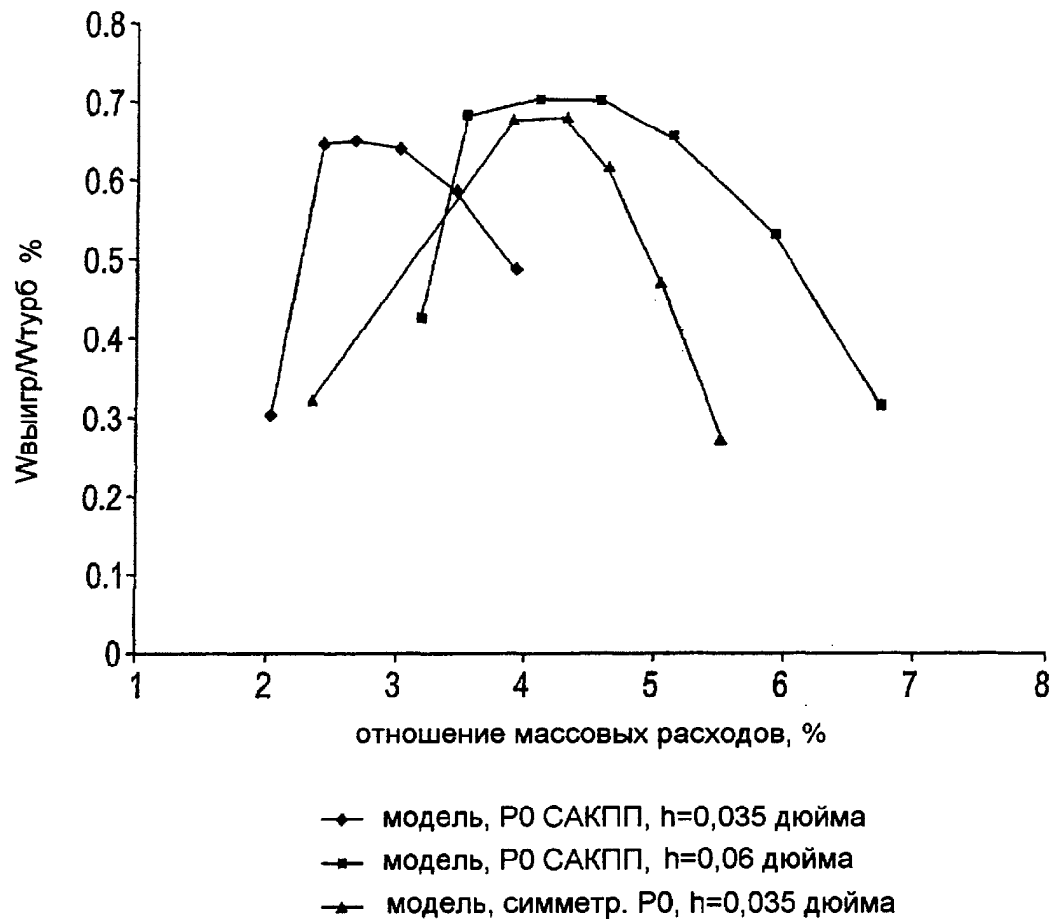


ФИГ. 10

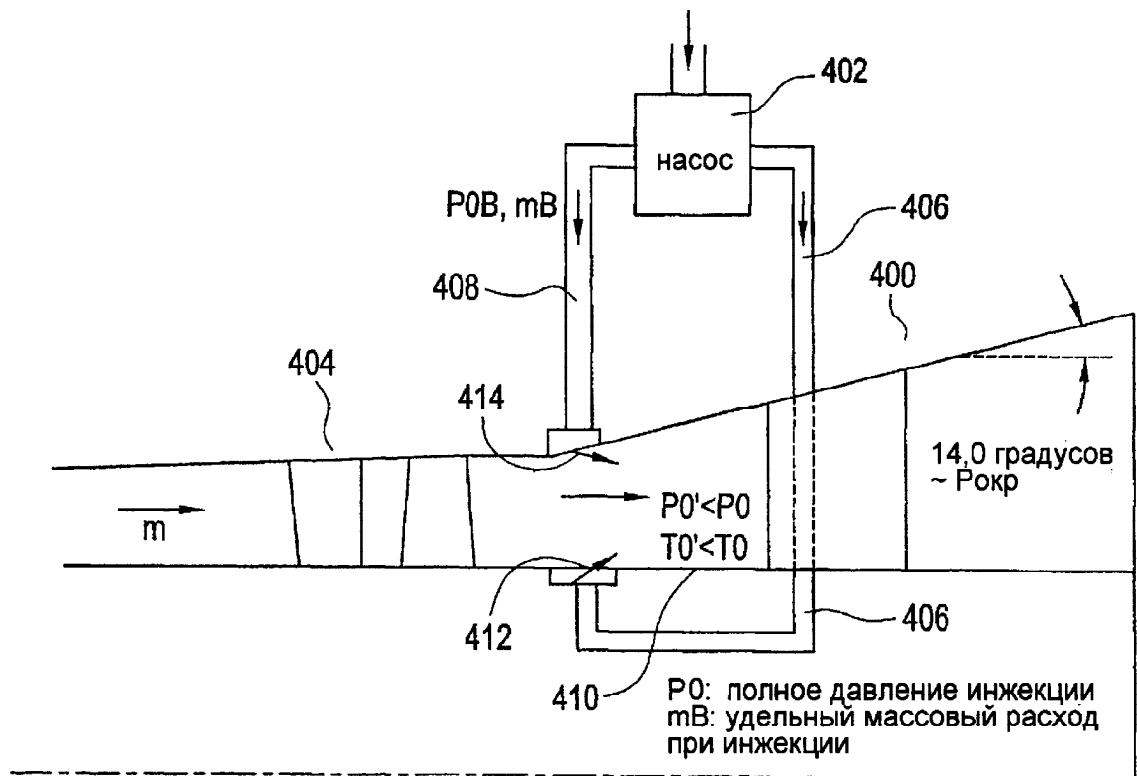


ФИГ. 11

Чистый выигрыш в работе турбины.
Эффекты профиля РОи высоты щели
(забор воздуха из турбины)

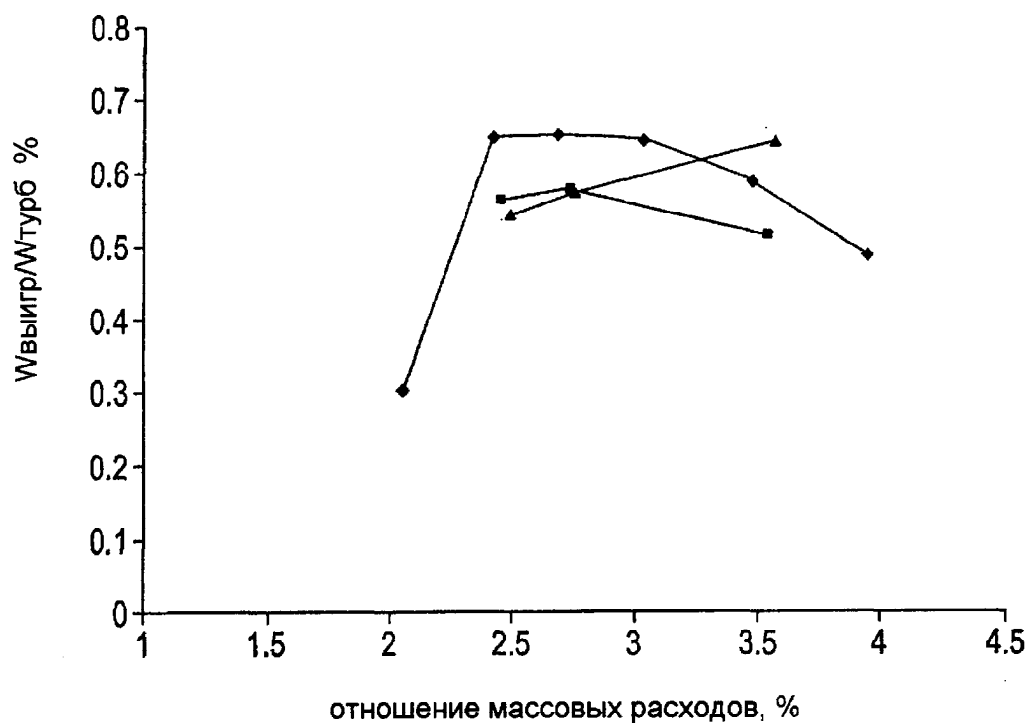


ФИГ. 12



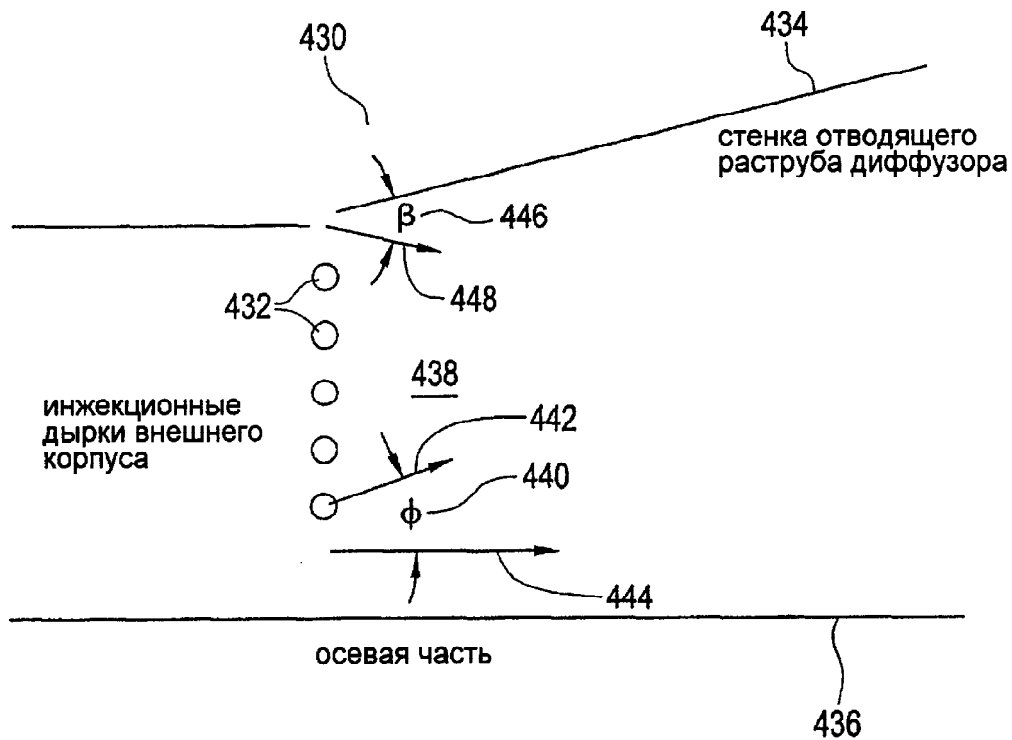
Фиг. 13

Чистый выигрыш в работе, получаемый от турбины

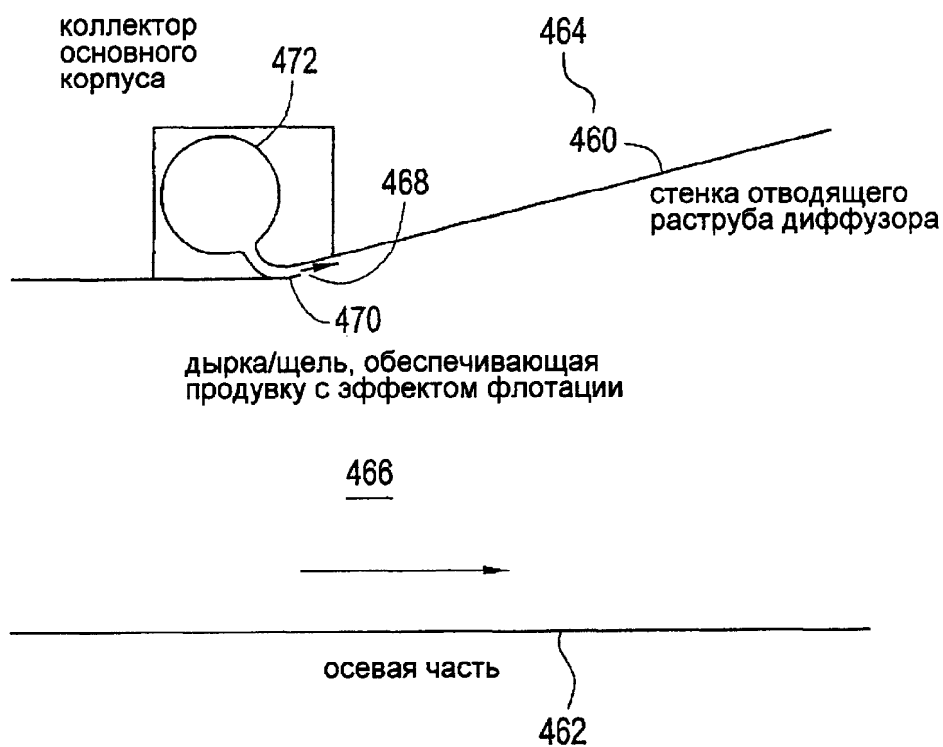


- ◆ модель, P0 САКПП, h=0,035 дюйма
- модель, P0 САКПП, h=0,2835 дюйма, отбор воздуха из турбины
- ▲ модель, P0 САКПП, h=0,2835 дюйма, независимый вспомогательный компрессор

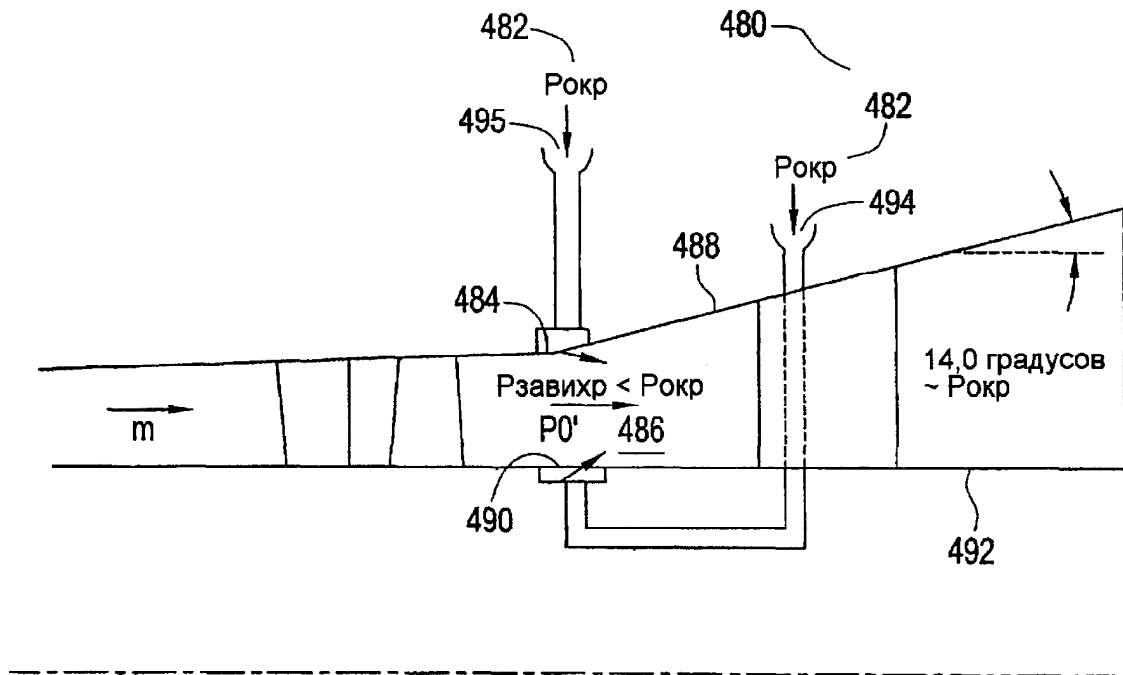
Фиг. 14



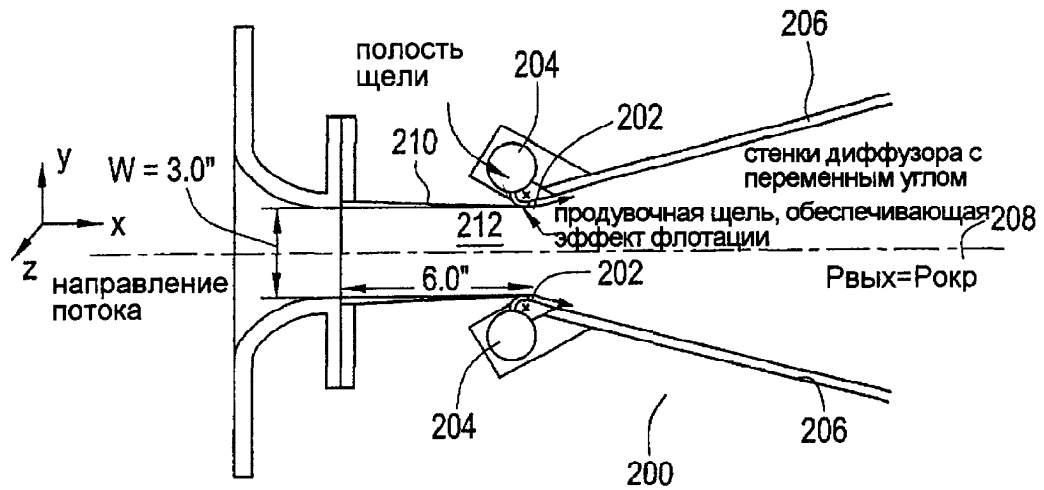
Фиг. 15



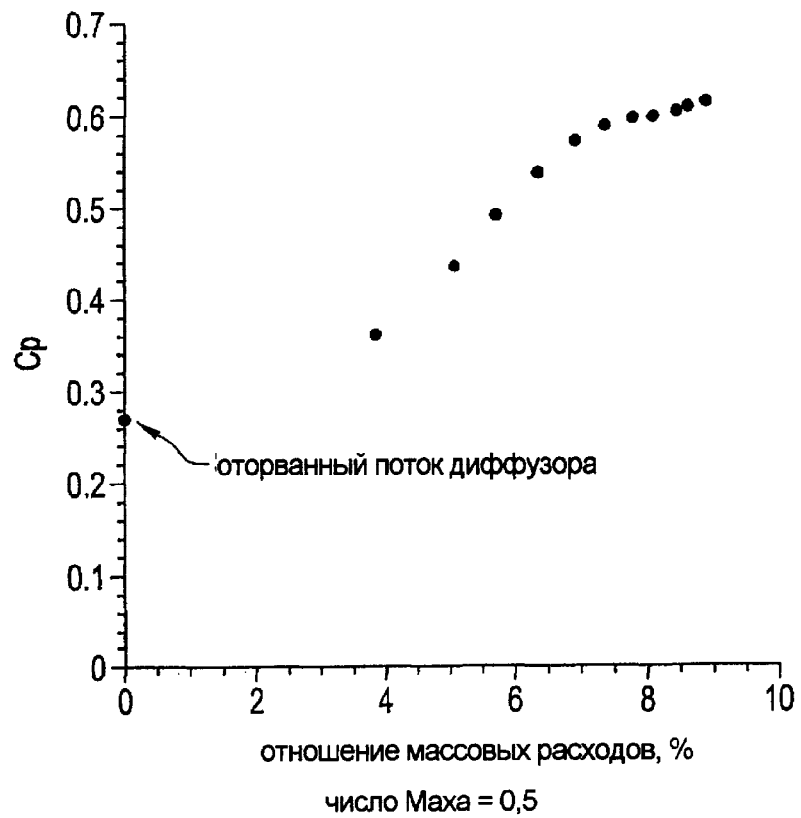
Фиг. 16



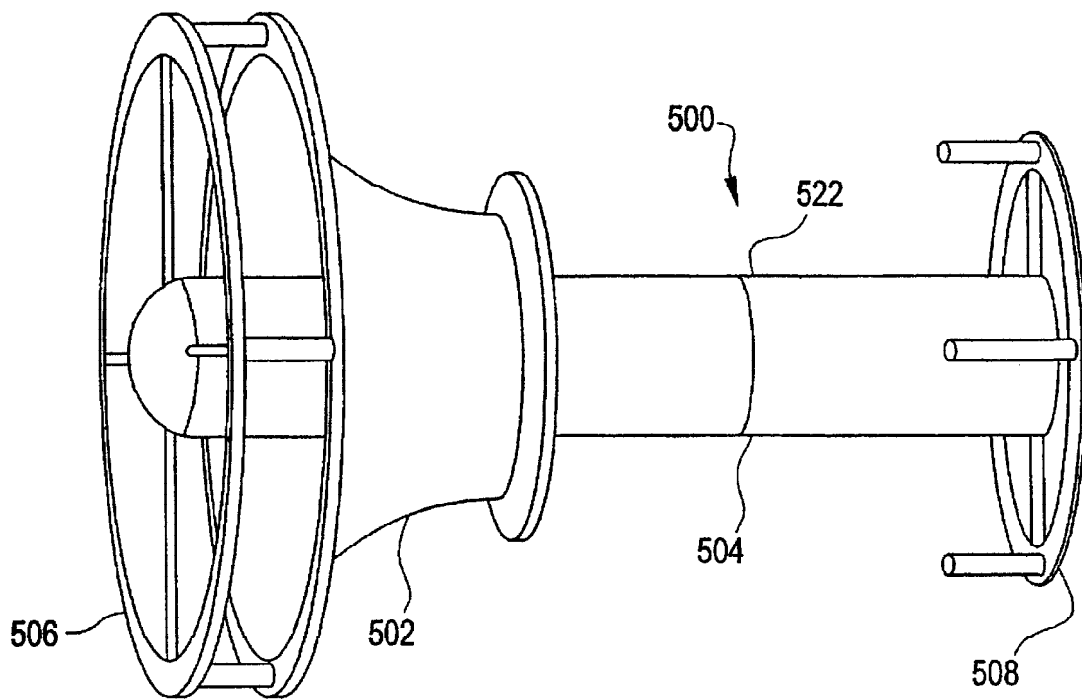
Фиг. 17



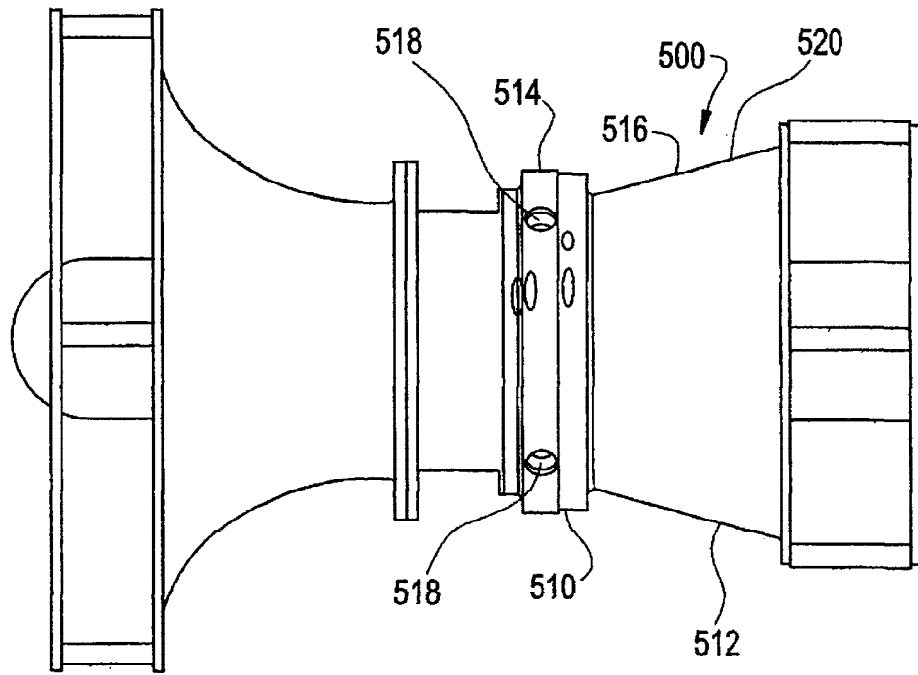
Фиг. 18



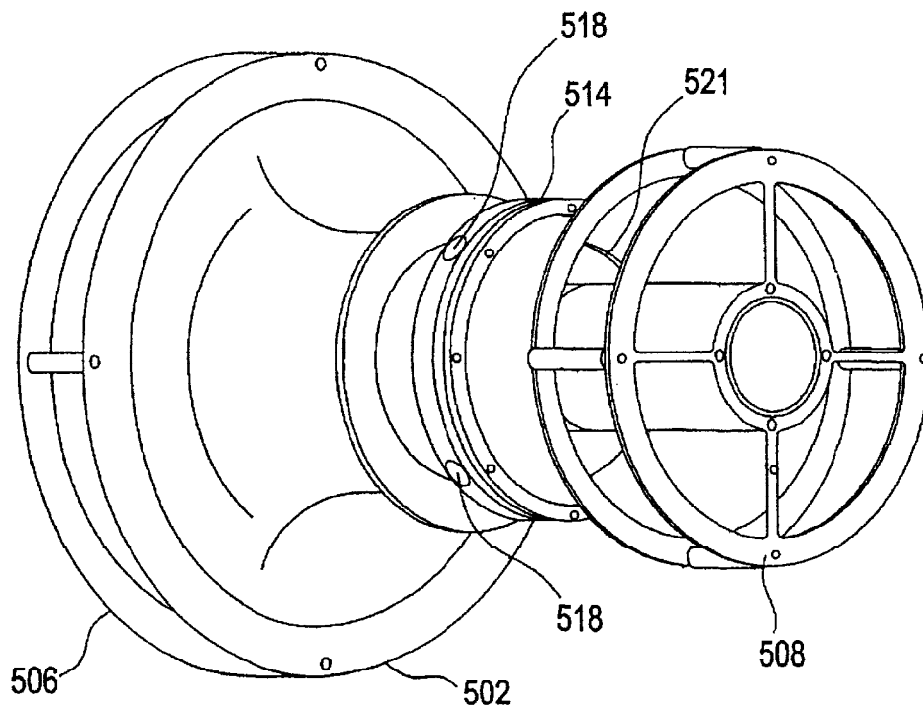
Фиг. 19



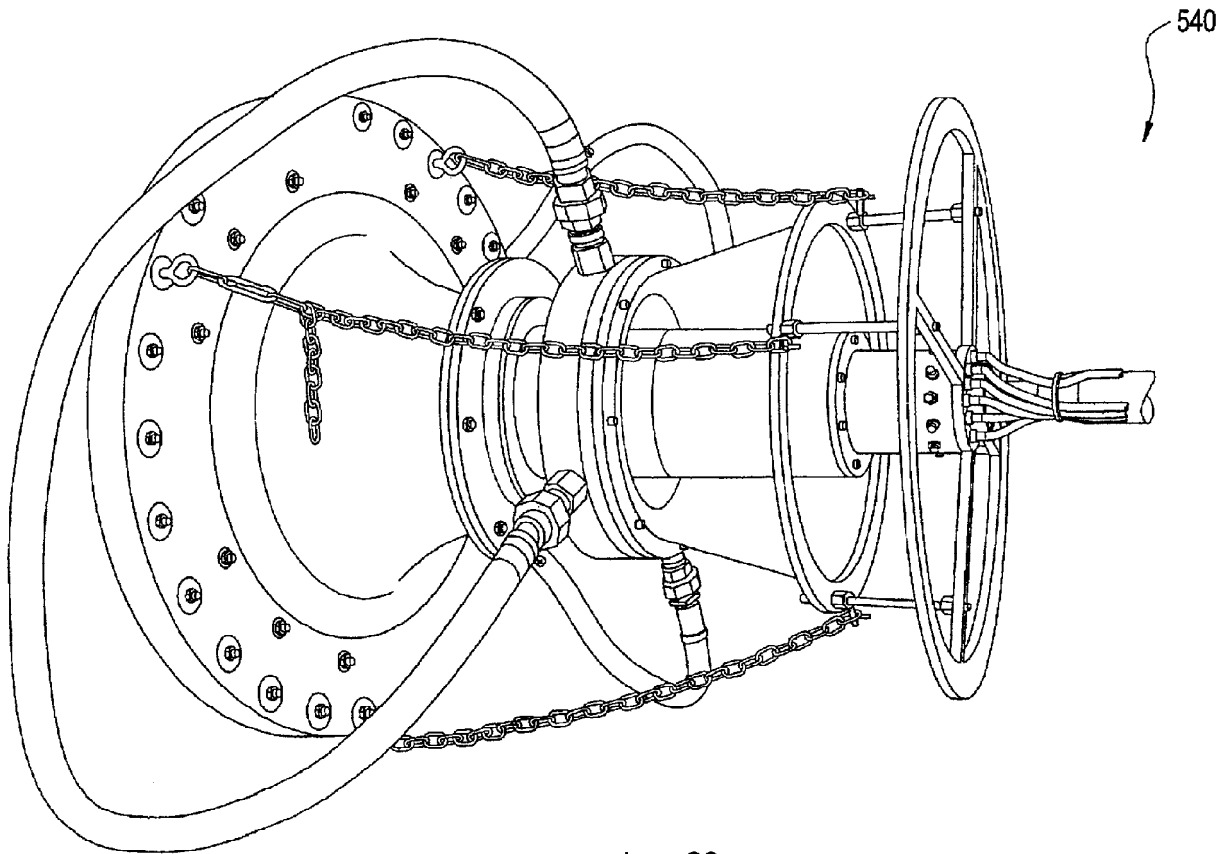
Фиг. 20



Фиг. 21

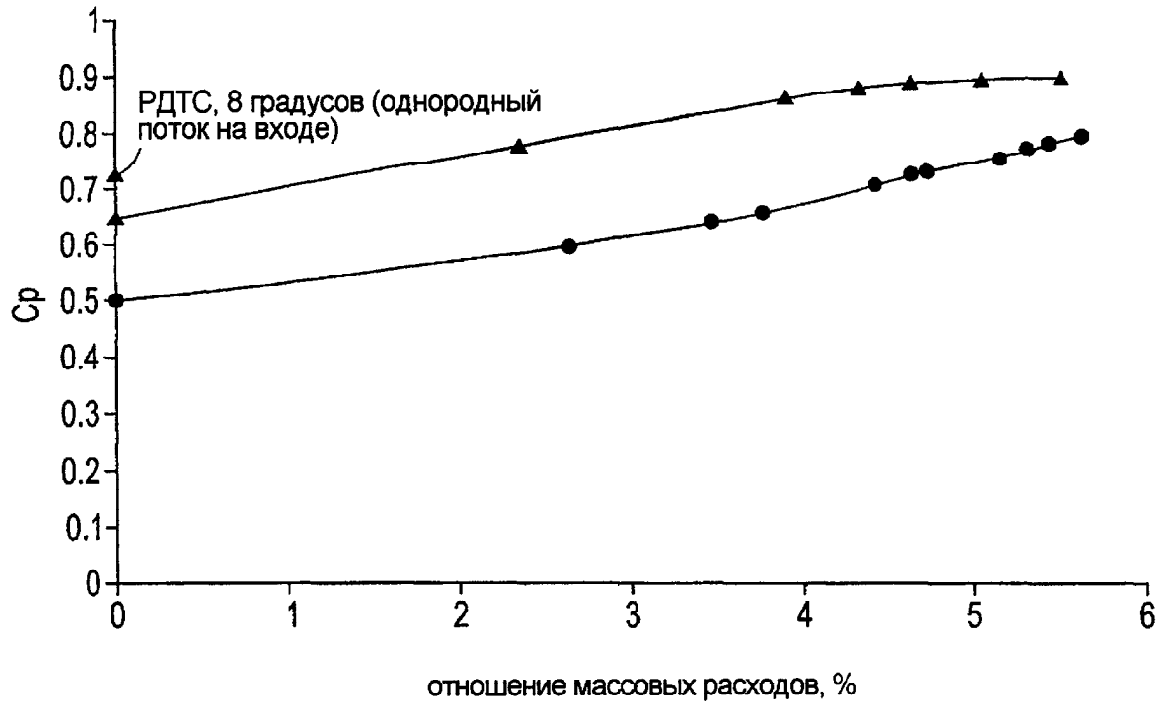


Фиг. 22



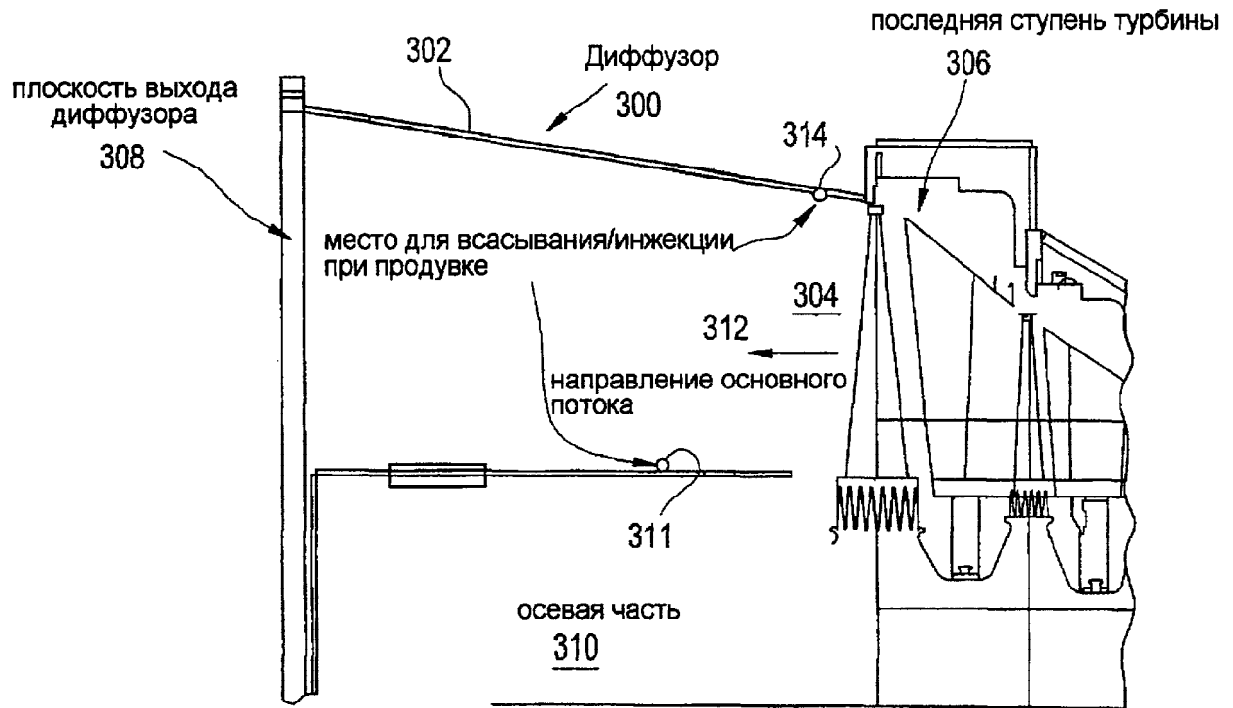
Фиг. 23

Геометрия с углом 14 градусов, отсутствие опор,
отсутствие радиальных лопаток

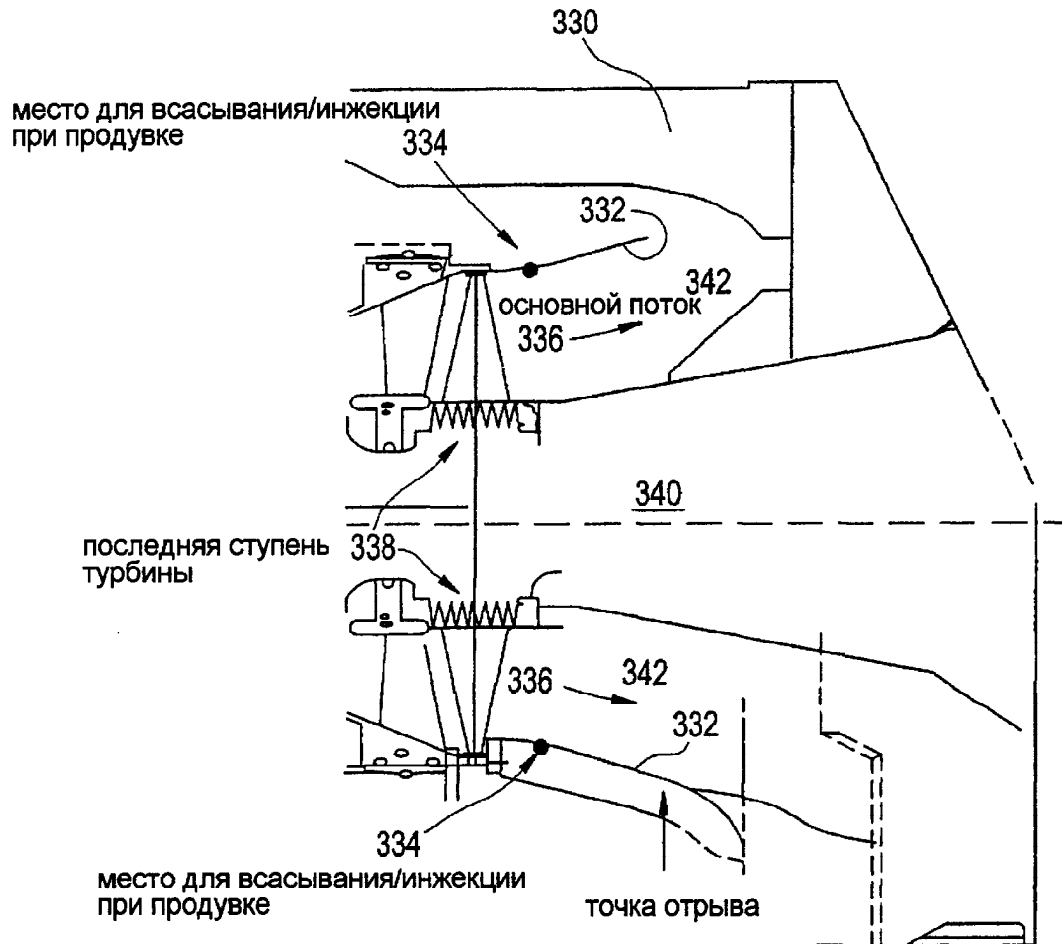


—▲— РДТС, однородный поток на входе
—●— эксперимент

Фиг. 24



Фиг. 25



Фиг. 26