



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2002132867/06, 09.12.2002

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.12.2002

(30) Приоритет: 11.12.2001 US 10/014,952

(43) Дата публикации заявки: 20.07.2004

(45) Опубликовано: 27.04.2006 Бюл. № 12

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 5695321 A, 09.12.1997. US 5738493
A, 14.04.1988. US 5975851 A, 02.11.1999. US
5741117 A, 02.04.1998. SU 1238465 A2,
27.02.1996. SU 1275962 A1, 27.01.1996. US
5813836 A, 29.09.1998.

Адрес для переписки:

191186, Санкт-Петербург, а/я 230, "АРС-
ПАТЕНТ", пат.пов. В.М.Рыбакову

(72) Автор(ы):

Мерри Брайан Д. (US)

(73) Патентообладатель(и):

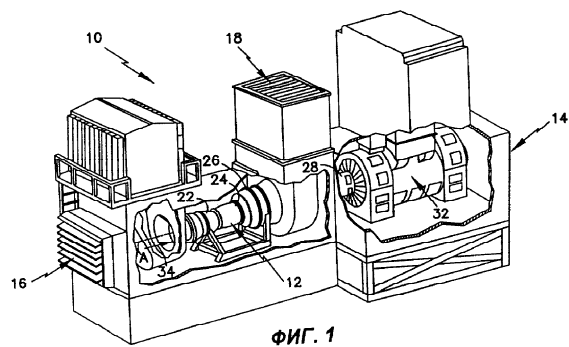
ЮНАЙТЕД ТЕКНОЛОДЖИЗ КОРПОРЕЙШН
(US)

(54) ОХЛАЖДАЕМАЯ ЛОПАТКА РОТОРА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Охлаждаемая лопатка ротора для промышленной газотурбинной установки имеет передний и задний контуры для охлаждающего воздуха. Перо лопатки имеет спинку и корыто, соединяющиеся в области передней кромки и в области задней кромки с образованием полости между ними, через которую проходят, по меньшей мере, частично контуры для охлаждающего воздуха и в которой расположены первый, передний петлевой, канал и второй, задний петлевой канал. У каждого из каналов имеется отрезок, в котором поток направлен вверх, и участок, в котором поток направлен вниз. Каждый петлевой канал имеет три отрезка, последовательно соединенные между собой и взаимно смещенные в продольном направлении, так что поток охлаждающего воздуха, поступающий в соответствующий канал, последовательно проходит через указанные отрезки, начиная со средней области пера, с выпуском охлаждающего

воздуха из третьего отрезка. Лопатка ротора содержит наборы ленточных выступов на боковых стенках спинки и корыта пера. Ленточные выступы каждого набора взаимно смещены в продольном направлении с заданным шагом, а также пространственно отделены и, по существу, параллельны смежным ленточным выступам того же набора на другой стенке. Каждый ленточный выступ находится внутри одного из отрезков соответствующего канала и характеризуется высотой выступа, измеряемой относительно смежной части боковой стенки, и отношением высоты выступа к шагу выступов для данного отрезка. В одном варианте ленточные выступы имеют постоянную высоту и постоянный шаг по всему отрезку соответствующих каналов для большинства отрезков каналов, за исключением отрезков, ближайших к областям входной и выходной кромок пера лопатки. Изобретение снижает затраты на изготовление лопатки. 2 н. и 16 з.п. ф-лы, 9 ил.



RU 2 2 7 5 5 0 8 C 2

RU 2 2 7 5 5 0 8 C 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.
F01D 5/18 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2002132867/06, 09.12.2002**

(24) Effective date for property rights: **09.12.2002**

(30) Priority: **11.12.2001 US 10/014,952**

(43) Application published: **20.07.2004**

(45) Date of publication: **27.04.2006 Bull. 12**

Mail address:

191186, Sankt-Peterburg, a/ja 230, "ARS-PATENT", pat.pov. V.M.Rybakovu

(72) Inventor(s):

Merri Brajan D. (US)

(73) Proprietor(s):

JuNAJTED TEKNOLODZHIZ KORPOREJShN (US)

(54) COOLED BLADE OF ROTOR FOR INDUSTRIAL GAS-TURBINE PLANT (VERSIONS)

(57) Abstract:

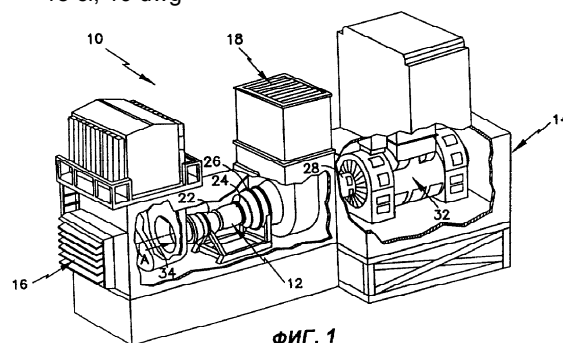
FIELD: mechanical engineering; gas-turbine plants.

SUBSTANCE: proposed cooled blade of rotor for industrial gas-turbine plant has front and rear cooling air loops. Feather of blade has back and pressure surface connected in area of leading edge and in area of trailing edge to form space through which at least part of cooling air loops pass and which accommodates first, front loop channel and second, rear loop channel. Each channel is provided with section in which flow is directed upwards and section in which flow is directed downwards. Each loop channel has three-connected sections displaced relatively in longitudinal direction so that cooling air flow getting into corresponding channel passes successively through indicated sections starting from middle area of feather with discharge of cooling air from third section. Rotor blade contains number of band projections on side walls of back and feather pressure surface. Band projections of each set are displaced relatively in longitudinal direction at preset pitch and are spatially separated and are mainly parallel to adjacent band projections of the same set on

other wall. Each band projection is located inside one of sections of corresponding channel and is characterized by height of projection measured relative to adjacent part of side wall and ratio of height of projection to pitch of projections for said section. According to one design version, band projections have constant height and constant pitch over entire section of corresponding channels for majority of channel sections, except for sections close to areas of leading and trailing edges of blade feather.

EFFECT: reduced cost of manufacture of blade.

18 cl, 10 dwg



ФИГ. 1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к охлаждаемым компонентам аэродинамического профиля типа применяемых в промышленных газотурбинных установках и, более конкретно, к структуре, обеспечивающей подачу текучей среды, такой как воздух, к критическим зонам аэродинамического профиля.

Уровень техники

Газотурбинные установки для воздушных судов используют лопатки ротора (называемые также рабочими лопатками), которые в типичном случае подвергаются охлаждению с целью уменьшения температурных напряжений. Уменьшение напряжений обеспечивает достаточную структурную прочность и долговечность турбинных лопаток. Были разработаны очень сложные схемы внутреннего охлаждения лопатки с использованием каналов для протекания текучей среды, в частности воздуха, имеющих извилистую (петлевую) форму.

В подобных применениях типичным является также использование теплопроводящих элементов, таких как ленточные, или полосковые выступы, служащих для создания турбулентного потока. Конструкции таких выступов (описанные, например, в патентах США №5695321, F 01 D 005/18, 09.12.1997 и 5738493, F 04 D 029/58, 14.04.1998) становятся все более сложными, в частности, предусматривающими вариации выступов по высоте, длине и углу наклона по отношению к направлению потока текучей среды в соответствующем канале. Эти конструкции определяются, в основном, учетом микроскопических факторов усиления теплопередачи в очень малой зоне пера лопатки, хотя и относятся к перу лопатки в целом.

Подобные теплопроводящие элементы увеличивают способность структуры пера лопатки передавать тепло охлаждающей текучей среды при ее движении внутри пера.

Одним из показателей качества подобных конструкций является эффективность теплопередачи структуры, определяемая как мера способности части канала передавать тепло при наличии заданной разности температур от стенки, ограничивающей отрезок канала, к охлаждающей текучей среде, протекающей по данному отрезку с определенной скоростью и при определенной температуре. Эффективность теплопередачи при неизменных прочих параметрах повышается при увеличении высоты выступа или уменьшении угла разворота между выступами при увеличении падения давления, под действием которого создается поток, во время протекания мимо выступов. Для сравнения получаемых результатов удобно использовать параметр, представляющий собой нормализованное отношение высоты выступов к углу их взаимного разворота, т.е. значение высоты выступа, деленное на угол разворота и умноженное на 100.

После определения названных конкретных параметров для малых зон пера лопатки необходимо еще решить проблему их использования таким образом, чтобы усилить теплопередачу, но не допустить неприемлемого возрастания стоимости изготовления.

Одну из важных областей для задач подобного рода представляют собой лопатки для промышленных газотурбинных установок. Наиболее близким аналогом предложенных технических решений является охлаждаемая лопатка ротора для промышленной газотурбинной установки, описанная в документе US 5395212 A, F 01 D 005/18, 07.03.1995. Известная лопатка имеет передний контур для охлаждающего воздуха и задний контур для охлаждающего воздуха. При этом перо лопатки имеет входную и выходную кромки, а также боковые стенки, образующие спинку и корыто пера. Между корытом и спинкой пера образована полость, через которую проходят контуры для охлаждающего воздуха и в которой расположены первый, передний петлевой канал и второй, задний петлевой канал. Известная лопатка ротора содержит также наборы ленточных выступов в каждом из петлевых каналов. При этом ленточные выступы каждого набора взаимно смещены в продольном направлении с заданным шагом, а также пространственно отделены от смежных ленточных выступов того же набора на другой стенке.

Поскольку в данной лопатке отношение высоты выступов к их шагу не оптимизировано по длине каждого петлевого канала, известное техническое решение характеризуется

ограниченной эффективностью теплопередачи и, как следствие, ограниченной эффективностью охлаждающего контура в целом.

Раскрытие изобретения

В связи с изложенным задача, на решение которой были направлены усилия изобретателей, заключается в разработке таких схем охлаждения пера лопатки в промышленных газотурбинных установках, которые обеспечивают приемлемую эффективность теплопередачи и приемлемую стоимость.

Настоящее изобретение частично основано на осознании того, что лопатка ротора в промышленной газотурбинной установке подвергается максимальной тепловой нагрузке при работе в стационарных условиях. При этом в ней существуют зоны локализации максимальной тепловой нагрузки, положение которых на пере лопатки остается относительно постоянным в течение длительных периодов. Положение этих зон не изменяется даже в случае изменений температуры потока текучей среды по длине канала, которые могут иметь место в случае использования камер сгорания трубчатого или трубчато-кольцевого типов. Таким образом, по сравнению с лопатками газотурбинных установок воздушных судов, положение высокотемпературных зон на лопатках промышленных установок можно считать постоянным во времени. Применительно к газотурбинным установкам воздушных судов максимальные тепловые нагрузки в типичном случае имеют место во время переходных периодов при взлете, т.е. на минимальной высоте, со снижением нагрузок при работе в стабильном крейсерском режиме. В этих условиях размеры и положение зон максимальной тепловой нагрузки смещаются по перу лопатки в связи с изменением характеристик охлаждающего потока воздуха при изменении режима полета, а также в связи с изменением тепловой нагрузки на канал охлаждения пера в результате изменения температуры и скорости газа в указанном канале.

Названное обстоятельство позволяет более тщательно оптимизировать конструкцию внутренних охлаждающих каналов в промышленной газотурбинной установке и сообщает некоторую гибкость в выборе конструкции, т.е. дает возможность разработать лопатку с пером, более простым в изготовлении, чем у лопаток, применяемых на авиационных газотурбинных установках. Такое упрощение может быть достигнуто в лопатках для промышленных газотурбинных установок за счет сокращения вариаций, в частности в конструкции наборов ленточных выступов по сравнению с аэродинамическим профилем (пером) лопатки авиационного двигателя, где необходимо учитывать смещение положения зоны максимальной теплопередачи при переходе на другой рабочий режим.

Кроме того, настоящее изобретение частично основывается на осознании того, что применительно к перу лопатки для промышленной газотурбинной установки, имеющему два петлевых канала, каждый из которых включает в себя три последовательно соединенных отрезка для протекания по ним охлаждающего воздуха от средней части пера к областям вблизи кромок пера, максимальная тепловая нагрузка имеет место в областях входной и выходной кромок. Охлаждающий воздух течет к третьему отрезку каждого петлевого канала, ближайшему по отношению к области соответствующей кромки, и выводится из петлевого канала через этот третий отрезок. Дополнительно в этой известной конфигурации предусматривается канал для охлаждающего воздуха в области входной кромки, т.е. лежащий между петлевым каналом и входной кромкой.

В соответствии с настоящим изобретением охлаждаемая рабочая лопатка (лопатка ротора) для промышленной газотурбинной установки согласно первому основному варианту выполнения имеет передний контур для охлаждающего воздуха и задний контур для охлаждающего воздуха. При этом перо лопатки по изобретению имеет область входной кромки, область выходной кромки и среднюю область, расположенную между областями входной и выходной кромок, а также боковые стенки, образующие спинку и корыто пера и соединяющиеся в области передней кромки и в области задней кромки с образованием полости между ними. Через данную полость проходят, по меньшей мере, частично контуры для охлаждающего воздуха, причем в ней расположены первый, передний петлевой канал и второй, задний петлевой канал.

В каждом из петлевых каналов имеются три последовательно соединенных отрезка для протекания по ним охлаждающего воздуха от средней области пера к соответствующей области кромки пера. При этом в каждом отрезке каждого петлевого канала имеются ленточные выступы (для краткости называемые также просто "выступы"), а отношение
 5 высоты выступа к шагу выступов, по меньшей мере, на одном из участков последующего отрезка выбрано большим, чем для предыдущего отрезка. Это сделано для того, чтобы повысить эффективность теплопередачи каждого последующего отрезка по мере приближения охлаждающего воздуха, протекающего в каждом петлевом канале, к области соответствующей кромки пера. Шаг выступов для наборов ленточных выступов в каждом
 10 отрезке выбран постоянным (за исключением последнего отрезка, через который охлаждающий воздух выводится из канала) для упрощения изготовления и контроля пера при более интенсивном отводе тепла из областей кромок пера по сравнению со средней областью.

В одном из конкретных вариантов осуществления изобретения третьи отрезки в обоих (переднем и заднем) петлевых каналах, по меньшей мере, на одном из своих участков характеризуются значением высоты выступа, превышающим аналогичные значения для остальных отрезков.

Далее, в соответствии с изобретением третьи отрезки в обоих (переднем и заднем) петлевых каналах, по меньшей мере, на одном из своих участков характеризуются
 20 значениями высоты выступа и нормализованным отношением высоты выступа к шагу выступов, превышающими аналогичные значения для второго отрезка. Благодаря этому в процессе протекания воздуха по заданному направлению через указанные каналы повышение эффективности теплопередачи третьими отрезками по сравнению со вторыми отрезками выше, чем аналогичное повышение эффективности для вторых отрезков по
 25 сравнению с первыми отрезками.

Кроме того, согласно изобретению в третьем отрезке как переднего, так и заднего петлевых каналов имеются первый участок, к которому поступает охлаждающий воздух из второго отрезка, и второй участок, расположенный по ходу потока за первым участком. При этом наборы ленточных выступов в третьем отрезке, расположенные на его втором
 30 участке, имеют значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышающие аналогичные значения в тех же наборах, расположенных на его первом участке, а также в наборах для второго отрезка того же контура. Кроме того, одна из характеристик наборов ленточных выступов во втором отрезке, представляющих собой значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышает
 35 аналогичную характеристику выступов в первом отрезке для того, чтобы обеспечить последовательное повышение эффективности теплопередачи вторых и третьих отрезков последовательно по ходу потока охлаждающего воздуха.

В соответствии с одним из вариантов высота выступа и отношение высоты выступа к шагу выступов в наборах ленточных выступов в отрезках переднего и заднего петлевых
 40 каналов, расположенных в первом и втором отрезках, не увеличиваются по всей длине отрезка.

В соответствии с еще одним из вариантов лопатка ротора снабжена третьим каналом, расположенным между входной кромкой и третьим отрезком переднего петлевого канала. У
 45 этого третьего канала имеется первый участок, смежный с хвостовиком, и второй участок, смежный с вершиной пера и характеризующийся большими значениями высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, чем у указанного первого участка. Желательно также, чтобы второй участок третьего канала, примыкающий к вершине, характеризовался большими значениями высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, чем у первого участка данного (третьего) канала, примыкающего к
 50 хвостовику.

В предпочтительном варианте лопатка ротора содержит хвостовик, имеющий первый проход для охлаждающего воздуха, через который проходит передний контур для охлаждающего воздуха и который обеспечивает связь по потоку воздуха с передней частью

полости для охлаждающего воздуха с целью подачи охлаждающего воздуха к каналу в области передней кромки и к переднему петлевому каналу. Хвостовик имеет также второй проход для охлаждающего воздуха, через который проходит задний контур для охлаждающего воздуха и который обеспечивает связь по потоку воздуха с задней частью

5 полости для охлаждающего воздуха с целью подачи охлаждающего воздуха к заднему петлевому каналу. При этом каждый проход характеризуется средним поперечным сечением, измеряемым перпендикулярно соответствующему контуру на каждом участке по длине контура, и связан с камерой, которая расположена смежно с указанной полостью и имеет поперечное сечение, превышающее среднее поперечное сечение расположенной

10 перед ней части указанного прохода. Данное увеличение поперечного сечения камеры выполнено для уменьшения скорости охлаждающего воздуха в рабочих условиях с целью повышения статического давления охлаждающего воздуха перед его поступлением внутрь пера и уменьшения потерь в указанном проходе.

Согласно второму основному варианту выполнения охлаждаемая лопатка ротора для

15 промышленной газотурбинной установки содержит:

хвостовик, обеспечивающий крепление лопатки ротора к роторному диску, и перо, имеющее первое ребро, которое расположено в средней области пера с ориентацией в продольном направлении, доходит до верхней стенки и разделяет полость, образованную в

20 пере, на переднюю и заднюю части. В передней части полости пера имеются;

второе ребро, расположенное от стенки хвостовика до верхней стенки и пространственно отделенное от входной кромки пера с образованием между ней и указанным ребром третьего канала вблизи входной кромки, состоящего из единственного

25 отрезка, который связан по потоку с первым проходом для охлаждающего воздуха,

третье ребро, отходящее от стенки хвостовика и пространственно смещенное в поперечном направлении от первого ребра с образованием между указанными ребрами

30 первого отрезка переднего петлевого канала, причем третье ребро образует стенку второго отрезка указанного канала и пространственно отделено в продольном направлении от верхней стенки зоной первого колена, соединяющего указанные первый и второй отрезки,

четвертое ребро, отходящее от верхней стенки, пространственно смещенное относительно третьего ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный второй отрезок, а также пространственно смещенное относительно второго ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный третий отрезок, причем четвертое ребро

35 пространственно отделено от стенки хвостовика зоной второго колена в переднем петлевом канале.

В задней части полости имеется пятое ребро, отходящее от стенки хвостовика и пространственно смещенное в поперечном направлении от первого ребра с образованием между указанными ребрами первого отрезка заднего петлевого канала. При этом пятое ребро образует стенку второго отрезка указанного канала и пространственно отделено в

40 продольном направлении от верхней стенки зоной первого колена, соединяющего указанные первый и второй отрезки заднего петлевого канала. В задней части полости имеется также шестое ребро, отходящее от верхней стенки, пространственно смещенное относительно пятого ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный второй отрезок, а также пространственно смещенное относительно выходной кромки и

45 ограничивающее, совместно с ней, указанный третий отрезок, причем шестое ребро пространственно отделено от стенки хвостовика зоной второго колена в заднем петлевом канале.

В качестве одного из наиболее существенных признаков настоящего изобретения можно отметить использование охлаждаемого пера лопатки с передним и задним петлевыми

50 каналами, у которых входной отрезок, расположенный в средней области пера, снабжен ленточными выступами только в переднем, но не в заднем петлевом канале. Другим важным признаком является неизменность высоты ленточных выступов по всей длине отрезка в большинстве отрезков обоих каналов. Следующим признаком является

изменение параметров (характеристик) ленточных выступов от отрезка к отрезку с соответствующим повышением эффективности теплопередачи последовательно по ходу потока охлаждающего воздуха. В качестве еще одного признака можно отметить угловое положение ленточных выступов, которые образуют острый угол со смежной внутренней структурой, ограничивающей каждый петлевой канал. В качестве дополнительного признака одного из вариантов осуществления можно отметить угловую ориентацию ленточных выступов в третьем канале, которые образуют своим передним краем острый угол с ребром переднего петлевого канала (т.е. со вторым ребром).

Основное преимущество, реализуемое с помощью изобретения, заключается в снижении затрат на изготовление пера в связи с упрощением его контроля и изготовления. Данное преимущество достигается благодаря созданию охлаждаемого пера лопатки, имеющего относительно постоянную высоту и относительно постоянный шаг ленточных выступов в большинстве отрезков охлаждающих каналов, выполненных внутри пера. Еще одним преимуществом является долговечность пера в рабочих условиях. Она обусловлена достаточно хорошим охлаждением областей входной и выходной кромок пера за счет перераспределения части охлаждающего воздуха от средней области пера к переднему петлевому каналу и усилению охлаждения зоны, охлаждаемой посредством переднего петлевого канала, с помощью дополнительного канала в области входной кромки пера.

Краткое описание чертежей

Перечисленные особенности и преимущества настоящего изобретения станут более понятными в свете нижеследующего подробного описания изобретения совместно с прилагаемыми чертежами.

Фиг.1 соответствует схематичному перспективному изображению, с частичным вырывом, промышленной газотурбинной установки в собранном состоянии.

Фиг.2 - перспективное изображение части роторного узла промышленной газотурбинной установки по фиг.1, на котором часть роторного узла удалена, чтобы показать часть роторного диска и охлаждаемую лопатку ротора.

На фиг.3 лопатка по фиг.2 представлена в продольном сечении, чтобы показать структуру ее внутреннего пространства.

Фиг.4 соответствует сечению лопатки поперечной плоскостью, которая на фиг.3 проходит на уровне L1, т.е. пересекает лопатку на высоте, примерно соответствующей 40% ее полной длины, и показывает передний петлевой канал, задний петлевой канал и третий канал в области входной кромки; обозначена также минимальная ширина канала, измеряемая в плоскости, проходящей через хорду пера лопатки.

Фиг.5 представляет собой схематичное изображение сечения части петлевых каналов, иллюстрирующее набор выступов, расположенных на каждом отрезке каналов с заданным взаимным смещением по сечению пера, которое для ясности понимания изображено неполностью.

На фиг.6 представлено схематичное изображение сечения частей петлевых каналов, показанных на фиг.5, иллюстрирующее относительную высоту выступов по сравнению с минимальной высотой канала.

На фиг.7 в графической форме представлены высота выступов в милах (1 мил=0,025 мм), а также безразмерная величина, соответствующая отношению высоты выступа к шагу смещения, умноженному на 100, для последовательно соединенных отрезков переднего и заднего петлевых каналов.

На фиг.8А и 8В приведены схематичные изображения переднего и заднего петлевых каналов, аналогичные изображениям этих каналов на фиг.7. Здесь все три отрезка в каждом канале показаны прилежащими друг к другу. На изображения каналов наложены графические представления высоты выступов (в милах) и безразмерное отношение высоты выступа к шагу смещения, умноженное на 100.

На фиг.9 дано схематичное частичное перспективное изображение части одного из каналов на виде по направлению потока охлаждающего воздуха. Здесь иллюстрируется

соотношение между выступом и смежными внутренними структурами пера лопатки, а также траекторией потока охлаждающего воздуха.

Осуществление изобретения

На фиг.1 представлено схематичное перспективное изображение с частичным вырывом, иллюстрирующее в собранном положении турбоагрегат 10, включающий в себя промышленную газотурбинную установку 12. В состав турбоагрегата входит корпус, представленный стенкой 14 и имеющий воздухозаборное окно для впуска воздуха 16 внутрь корпуса, а также выпускное окно 18 для вывода из корпуса выхлопных газов. Промышленная газотурбинная установка 12 имеет в своем составе компрессорную секцию 22, камеру 24 (секцию) сгорания и турбинную секцию 26, в состав которой входит турбина (не изображена). У промышленной газотурбинной установки имеется роторный узел с валом (не изображен), ориентированным по оси А. Данный вал передает энергию в компрессорную секцию; кроме того, по нему выхлопные газы поступают к турбине для приведения ее во вращение. Турбина связана вторым валом 28 с электрической машиной, такой как генератор 32 для передачи этому генератору механической энергии вращения.

Контур 34 для рабочей газовой среды проходит через компрессорную секцию 33, секцию 24 сгорания и турбинную секцию 26. Рабочая газовая среда в виде воздуха протекает через компрессорную секцию, в которой происходит сжатие газов. В камере сгорания воздух смешивается с топливом и результирующая смесь сжигается с приданием газам дополнительной энергии. Горячие рабочие газы под высоким давлением расширяются в турбинной секции и приводят во вращение роторный узел. Энергия вращения используется для сжатия газов в компрессорной секции, которые, как было указано, затем приводят в действие турбину. Меньшая часть рабочих газов (воздуха) после сжатия в компрессорной секции подается к турбинной секции для охлаждения критических компонентов этой секции.

На фиг.2 дано перспективное изображение части роторного узла 36, входящего в промышленную газотурбинную установку 12, показанную на фиг.1. Роторный узел включает в себя диск 38 ротора (роторный диск) и рабочую лопатку (лопатку ротора) 42, которая закреплена на роторном диске. У лопатки ротора имеется наружная поверхность 44 и внутренняя поверхность 46. Охлаждаемая лопатка ротора характеризуется продольным направлением D_c ориентации своего пера и поперечным направлением D_s , соответствующим хорде пера лопатки. При работе турбины охлаждаемая лопатка ротора находится в потоке горячей рабочей среды.

Охлаждающий воздух течет от компрессорной секции 22 к источнику охлаждающего воздуха, представленному на фиг.2 зоной 48 подачи охлаждающего воздуха для охлаждения лопатки 42 ротора. Внутренняя часть 46 лопатки выполнена с возможностью приема охлаждающего воздуха для охлаждения лопатки ротора. Охлаждение необходимо для того, чтобы удерживать рабочую температуру лопатки ротора в пределах, которые являются допустимыми для материала, из которого она изготовлена.

Охлаждаемая лопатка ротора имеет внутренний край 52 и наружный край 54 с вершинной зоной 56, расположенной на наружном краю 54. Корневая часть (хвостовик) 58 у внутреннего края 52 лопатки ротора обеспечивает крепление лопатки ротора к роторному диску. У лопатки ротора имеются также полка (платформа) 62 и перо 64, отходящее в наружном направлении от полки. У пера 64 лопатки имеется продольная ось (не изображена), расположенная перпендикулярно оси А газотурбинной установки (т.е. вертикально на фиг.2). Перо лопатки образовано множеством участков аэродинамического профиля, которые ориентированы вдоль хорды пера и наложены друг на друга в направлении продольной оси. У пера 64 имеется входная кромка 66 и зона 68 вблизи входной кромки, которая отходит от входной кромки 66 в направлении назад. Перо имеет также выходную кромку 72 и область 74 вблизи выходной кромки, которая отходит от выходной кромки в направлении вперед. У пера имеется выпуклая боковая сторона 76, называемая спинкой, и вогнутая боковая сторона 78, называемая корытом (см. фиг.4). Каждая из этих сторон расположена между областью вблизи входной кромки (называемую также "областью входной кромки") и областью вблизи выходной кромки (называемую также

"областью выходной кромки"). У пера можно выделить также среднюю область 82, которая расположена между областями вблизи входной и выходной кромок.

На фиг.3 лопатка ротора по фиг.2 представлена на виде спереди и в продольном сечении для того, чтобы проиллюстрировать структуру внутренней поверхности 46 лопатки. Кормило 78 соединено со спинкой 76 в области 68 передней кромки с образованием структуры в форме лопасти аэродинамического профиля, соответствующей передней стенке 84. Аналогично, кормило 78 соединено со спинкой 76 в области 74 задней кромки с образованием структуры в форме лопасти аэродинамического профиля, соответствующей задней стенке 86. Между кормилом 78 и спинкой 76, взаимно смещенными вдоль хорды пера, образована полость 88, предназначенная для подачи в нее охлаждающего воздуха от зоны 48 подачи.

У лопатки 42 ротора имеется передний проточный контур 92 для охлаждающего воздуха и задний проточный контур 94 для охлаждающего воздуха. Эти контуры проходят через стенку 96 хвостовика 58, ориентированную в направлении хорды пера. В вершинной зоне 56 пера имеется верхняя стенка 98. Множество выпускных отверстий, представленных на фиг.3 отверстиями 102, 104 и 106 и выполненных в стенке 98, обеспечивает сообщение полости 88 для охлаждающего воздуха с наружной поверхностью пера у верхней (наружной) стенки пера 64 лопатки. Задняя стенка 86 пера также снабжена множеством охлаждающих отверстий 108, расположенных со смещением в продольном направлении вдоль стенки 86. Эти отверстия также обеспечивают сообщение полости 88 с наружной поверхностью пера.

Как показано на фиг.3, в хвостовике выполнен первый проход 112 для охлаждающего воздуха, обеспечивающий связь лопатки по потоку охлаждающей текучей среды (воздуха) с компрессорной секцией 122 через зону 48 подачи. Этот первый проход 112 включает в себя первую камеру 114, первую проточную зону, расположенную по ходу потока воздуха перед первой камерой 114, и вторую проточную зону, расположенную за камерой 114 и имеющую больший объем, чем первая зона. В хвостовике выполнен также второй охлаждающий проход 116, который также обеспечивает связь лопатки по потоку охлаждающего воздуха с источником сжатого воздуха. Этот второй охлаждающий проход 116 включает в себя вторую камеру 118, первую проточную зону, расположенную по ходу потока перед второй камерой 118, и вторую проточную зону, расположенную за камерой 118 и имеющую больший объем, чем первая зона. Зона 48 подачи обеспечивает питание охлаждающим воздухом обоих названных проходов при одинаковом давлении. В альтернативном варианте зона подачи может содержать переднюю часть и заднюю часть, отделенные друг от друга и снабжаемые охлаждающим воздухом от компрессорной секции под различными давлениями.

На фиг.4 показано, в увеличенном масштабе, сечение лопатки поперечной плоскостью, которая на фиг.3 проходит на уровне L1, соответствующем примерно 40% длины S пера лопатки ($L1=0,38S$). Как показано на фиг.3 и 4, лопатка ротора имеет первый (передний) петлевой канал 122, второй (задний) петлевой канал 124 и третий канал 126 вблизи входной кромки пера. На фиг.4 показаны минимальные значения H_m ширины каждого канала в различных участках 1-7 сечения пера лопатки. Как видно из фиг.4, значения H_m измеряются от спинки 76 пера в направлении кормила 78 пера вдоль линии, перпендикулярной спинке пера. В названных каналах имеются ленточные выступы T, изображенные в иллюстративных целях в увеличенном масштабе.

У пера лопатки имеются также ребра, которые ориентированы в продольном направлении и расположены от спинки 76 до кормила 78 пера. Они образуют внутренние структуры пера, примыкающие к петлевым каналам и формирующие их стенки. Кроме того, передняя стенка 84 пера вблизи его входной кромки, примыкающая к третьему каналу 126, расположенному у входной кромки, а также задняя стенка 86 вблизи выходной кромки пера, примыкающая к заднему петлевому каналу 124, тоже образуют внутренние структуры пера, формирующие стенки названных каналов. Каждый из петлевых каналов имеет три участка или отрезка (а именно отрезки 122a, 122b, 122c для переднего петлевого канала

и 124a, 124b, 124c для заднего петлевого канала). Каждый отрезок ориентирован в продольном направлении и, как было указано, ограничен ребрами.

Первое ребро 132, ориентированное в продольном направлении, расположено в средней части 82 пера и проходит до стенки 98 в его вершинной зоне. Это ребро делит
 5 полость 88 на переднюю часть 88a и на заднюю часть 88b. Передняя часть 88a полости снабжена вторым ребром 134, которое расположено от стенки 96 хвостовика лопатки до стенки 98 в вершинной зоне пера. Это ребро пространственно отделено от входной кромки 66, так что между ними образуется третий канал 126.

Третье ребро 136, отходящее от стенки 96 хвостовика, пространственно отделено в
 10 направлении хорды пера от первого ребра 132, так что между ними располагается первый отрезок 122a переднего петлевого канала 122. Третье ребро 132 ограничивает также второй отрезок 122b этого канала. Третье ребро 132 пространственно отделено от верхней стенки 98, благодаря чему между ними образуется первое колено 138, сопрягающее первый и второй отрезки переднего петлевого канала.

Четвертое ребро 142, отходящее от верхней стенки 98 вершинной зоны пера, пространственно смещено в направлении хорды пера относительно третьего ребра 136 и вместе с ним ограничивает второй отрезок 122b. Четвертое ребро пространственно смещено также в направлении хорды пера относительно второго ребра 134 и вместе с ним ограничивает третий отрезок 122c. Далее, четвертое ребро пространственно отделено от
 20 стенки хвостовика, за счет чего между ними формируется второе колено 144 для переднего петлевого канала 122.

В задней части 88b полости имеется пятое ребро 146, отходящее от стенки 98 хвостовика. Пятое ребро пространственно смещено в направлении хорды пера относительно первого ребра и вместе с ним ограничивает первый отрезок 124a заднего
 25 петлевого канала 124. Пятое ребро ограничивает также второй отрезок 124b этого канала. Далее, пятое ребро пространственно отделено от стенки вершинной части пера, за счет чего между ними формируется первое колено 148 для заднего петлевого канала.

В задней части пера имеется шестое ребро 152, которое выступает в продольном направлении из стенки 98 вершинной зоны пера. Шестое ребро пространственно смещено
 30 в направлении хорды пера относительно пятого ребра и вместе с ним ограничивает второй отрезок 124b. Шестое ребро пространственно смещено также в направлении хорды пера относительно задней стенки 86 пера и вместе с ним ограничивает второй отрезок 124b. Далее, четвертое ребро пространственно отделено от стенки хвостовика, за счет чего между ними формируется второе колено 154 для заднего петлевого канала 122.

У каждого из каналов, в том числе у переднего петлевого канала 122, у заднего петлевого канала 124 и у третьего канала 126 вблизи передней кромки пера имеется
 35 выходной конец 158, 162, 156 соответственно. Каждый выходной конец канала сообщается по потоку с соответствующим ему выпускным отверстием 104, 106, 102. Названные отверстия проходят через вершинную зону 56 пера, сообщаясь с наружной поверхностью пера 44. Таким образом, выпускное отверстие обеспечивает сообщение выходного конца соответствующего канала с наружной поверхностью пера.

Каждый из каналов, включая передний петлевой канал 122, задний петлевой канал 124 и третий канал 126 вблизи передней кромки пера снабжен, по меньшей мере, одним набором ленточных выступов Ts со стороны спинки пера и, по меньшей мере, одним набором
 45 выступов Tr со стороны корыта. Таким образом, для каждого канала сформированы, по меньшей мере, два набора выступов. В варианте, представленном на чертежах (см., например, фиг.4, 6), передний петлевой канал снабжен выступами со стороны спинки и со стороны корыта в каждом из своих отрезков. Набор выступов почти полностью (на 90%) перекрывает длину соответствующего отрезка. Однако некоторые преимущества,
 50 создаваемые настоящим изобретением, могут быть реализованы и при меньшем перекрытии.

Итак, первый отрезок 122a снабжен наборами T4p и T4s выступов, выполненными соответственно на его сторонах, примыкающих к корыту и спинке пера. Второй отрезок

122b снабжен наборами Т3р и Т3s выступов, выполненными соответственно на его сторонах, примыкающих к корыту и спинке пера. Третий отрезок 122с снабжен наборами Т2р и Т2s выступов, выполненными соответственно на его сторонах, примыкающих к корыту и спинке пера. У третьего отрезка имеется первый участок 122са, к которому поступает охлаждающий воздух из второго отрезка, и второй участок 122сб, расположенный по ходу потока за первым участком (фиг.6). При этом наборы ленточных выступов в третьем отрезке, расположенные на его втором участке 122сб, имеют значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышающие аналогичные значения в тех же наборах, расположенных на его первом участке 122са, а также в наборах для второго отрезка 122b того же контура.

Задний петлевой канал не имеет выступов на своем первом отрезке. Его второй и третий отрезки снабжены наборами ленточных выступов. В частности, второй отрезок снабжен наборами Т6р и Т6s ленточных выступов, выполненными соответственно на его сторонах, примыкающих к корыту и спинке пера. Третий отрезок снабжен наборами Т7р и Т7s ленточных выступов, выполненными соответственно на его сторонах, примыкающих к корыту и спинке пера. При этом у третьего отрезка имеется входная по потоку часть и выходная часть, причем выступы выходной части несколько отличаются от выступов входной части.

Выступы Т на каждой стороне, примыкающей к спинке 76 или корыту 78 пера, расположены с взаимным смещением в продольном направлении, имеющем определенный шаг, а также со смещением относительно выступов, расположенных на противоположной стороне канала (фиг.6). Для каждого ленточного выступа могут быть определены передний (по направлению потока охлаждающего воздуха) и задний края, а также стенка канала, из которой он выступает. Например, на отрезке 122b (см. фиг.9) имеется ленточный выступ Т3 (точнее Т3s) на боковой стенке, соответствующей спинке пера, причем у этого выступа имеется передний край (Т3su) и задний край (Т3sd). Выступы каждого набора параллельны друг другу и параллельны выступам на противоположной боковой стенке канала. Каждый ленточный выступ характеризуется высотой Н, измеряемой от примыкающей к нему части боковой стенки и далее обозначаемой как "е", и отношением (е/р) высоты выступа к шагу выступов, характеризующему их взаимное смещение. Это отношение может быть нормализовано путем умножения на 100. Каждый ленточный выступ со стороны своего входного края образует острый угол, примерно равный 45°, с примыкающей к нему внутренней структурой пера, ограничивающей петлевой канал.

На некоторых участках канала выступы могут быть удалены для того, чтобы обеспечить возможность измерения толщины стенки лопатки в процессе ее изготовления. Это решение позволяет также осуществлять контроль качества изготовления пера лопатки. Соответствующие участки отмечены индексом Q (фиг.3). Удаление части или всего выступа для указанной цели не рассматривается как изменение шага в наборе соответствующих выступов. В типичном случае удаление выступа (полностью или частично) для целей контроля качества будет иметь место на трех участках каждой боковой стенки каждого отрезка канала.

В приводимой ниже таблице для одного из вариантов настоящего изобретения приводятся значения высоты (H_T) выступов, шага (P_T) смещения и нормализованного отношения $((e/p) \times 100)$ высоты выступа к шагу выступов. Эти данные приводятся для ленточных выступов, примыкающих к продольно внутренней и продольно внешней частям каждого набора выступов. В таблице приведены значения минимального расстояния H_p (т.е. H_m) между боковыми стенками со стороны спинки и корыта пера, измеренные в осевом направлении на высоте, составляющей примерно 40% высоты S пера ($L_s = 0,38S$ - см. фиг.3 и 4).

Таблица							
Выступы, ближайšie к хвостовику				Выступы, ближайšie к вершине			
Номер выступа	H_T , мил/мм	P_T , мил/мм	$e/p \times 100$	$e/p \times 100$	H_T , мил/мм	P_T , мил/мм	H_m , мил/мм

1	10/0,25	100/2,5	10	20	20/0,51	100/2,5	264/7
2	15/0,38	150/3,8	10	20	30/0,76	150/3,8	382/10
3	10/0,25	100/2,5	10	10	10/0,25	100/2,5	472/12
4	10/0,25	200/5,1	5	5	10/0,25	200/5,1	527/13
5	0/0,00	100/2,5	-	-	0/0,00	100/2,5	601/15
6	10/0,25	200/5,1	5	5	10/0,25	200/5,1	411/10
7	10/0,25	100/2,5	10	20	15/0,38	75/1,9	151/4

Фиг.5 представляет собой схематичное изображение сечения части петлевых каналов, иллюстрирующее наборы ленточных выступов, расположенных на каждом отрезке каналов с заданным взаимным смещением по линии пера, которое для ясности понимания изображено неполностью. Плоскость частичного сечения соответствует линиям 5-5 на фиг.3. Более точно, для участков пера лопатки, соответствующих позициям 1, 3, 4 и 5 в направлении хорды пера, считая от входной кромки, плоскость сечения расположена на высоте, составляющей примерно 40% полной длины пера ($S=0,38$). Для позиций 2 и 7 в направлении хорды пера плоскость сечения расположена на высоте, составляющей соответственно примерно 30% ($S=0,29$) и 50% ($S=0,47$) полной длины пера. Стрелки на фиг.5 показывают направление движения воздуха в каналах.

Как показано на фиг.5, каждый ленточный выступ имеет выпуклый цилиндрический вершинный участок с радиусом, составляющим половину высоты выступа ($R_{vx}=H/2=e/2$), и вогнутые участки T3su T3sd (см. также фиг.9), расположенные соответственно на передней и задней сторонах выступа и обеспечивающие переход по цилиндрической поверхности к боковой стенке канала. Радиус этих переходных участков равен половине высоты выступа ($R_{av}=H/2=e/2$). Высота $H(e)$ выступов в первом, втором и третьем каналах выбрана в интервале, приближенно составляющем 0,25-0,76 мм ($0,25 \text{ мм} \leq e, H \leq 0,76 \text{ мм}$).

На фиг.6 представлено схематичное изображение сечения частей петлевых каналов, показанных на фиг.5, иллюстрирующее относительную высоту выступов по сравнению с минимальной высотой канала и шагом смещения выступов.

На фиг.7 в графической форме представлены высота выступов в милах, а также безразмерная величина, соответствующая нормализованному отношению высоты выступа к шагу смещения, для последовательно соединенных отрезков 122a, 122b, 122c переднего петлевого канала и для последовательно соединенных отрезков 124a, 124b, 122c заднего петлевого канала.

На фиг.8А и 8В приведены схематичные изображения переднего и заднего петлевых каналов, аналогичные изображениям этих каналов на фиг.7. Здесь все три отрезка в каждом канале показаны прилежащими друг к другу. На изображения каналов наложены графические представления высоты выступа (в милах) и безразмерное нормализованное отношение высоты выступа к шагу смещения.

На фиг.9 дано схематичное частичное перспективное изображение части одного из каналов. Здесь иллюстрируется соотношение между ленточным выступом и смежными внутренними структурами пера лопатки, а также траекторией потока охлаждающего воздуха. Как показано на фиг.9, со своей передней стороны выступ расположен под острым углом к ребру, ближайшему к соответствующей кромке пера. В результате часть охлаждающего воздуха отклоняется в сторону данной кромки и в канал с движением потока в направлении против часовой стрелки. Это повышает турбулентность воздуха в канале и усиливает теплопередачу (т.е. отбор тепла) от ребра, ближайшего к кромке пера.

В рабочих условиях, т.е. в процессе работы газотурбинной установки, охлаждаемой рабочей лопатке передается тепло от потока рабочей среды. Тепловой поток является более интенсивным в областях вблизи входной кромки и выходной кромки и менее интенсивным в средней части пера лопатки. Охлаждающий воздух протекает в средней части лопатки по переднему петлевому каналу 122 и по заднему петлевому каналу 124.

Первый отрезок 122a переднего петлевого канала снабжен ленточными выступами, но в первом отрезке 124a заднего петлевого канала выступы отсутствуют. Передний петлевой канал отводит от средней части пера большее количество тепла, чем задний петлевой

канал. В результате задний петлевой канал создает меньше помех для протекания потока и имеет меньшие потери давления, под действием которого поток продвигается через третий отрезок этого канала. Данное обстоятельство является важным, поскольку третий отрезок заднего петлевого канала имеет меньшее сечение, чем третий отрезок переднего петлевого канала. Кроме того, поскольку в первом отрезке нет выступов, охлаждающий воздух в заднем петлевом канале нагревается меньше, чем в переднем. В результате охлаждающий воздух в заднем петлевом канале имеет большую способность отвода тепла от области задней кромки пера, чем охлаждающий воздух с более высокой температурой, которую поток в заднем петлевом канале имел бы при наличии выступов в первом отрезке этого канала. Таким образом, конструкция лопатки по изобретению обеспечивает отвод тепла от средней области пера при одновременном повышении способности охлаждающего воздуха (как в отношении температуры, так и давления) к охлаждению критической области задней кромки.

Наборы выступов в отрезках переднего и заднего петлевых каналов, а именно в первом отрезке 122a и во вторых отрезках 122b, 124b, не используют увеличение высоты выступа или отношения высоты выступа к шагу смещения выступов по длине соответствующего отрезка или канала в целом. Такая конструкция упрощает подготовку пресс-форм, применяемых при изготовлении лопатки ротора, и увеличивает удобство контроля в процессе изготовления пера лопатки.

Передний петлевой канал 122 и задний петлевой канал 124 в своих третьих отрезках 122c, 124c содержат выступы, у которых как высота выступа, так и отношение высоты к шагу смещения имеют, по меньшей мере, на вторых по ходу потока участках 122cb, 124cb третьего отрезка более высокие значения, чем аналогичные значения для вторых отрезков 122b, 124b. Тем самым обеспечивается большее повышение эффективности теплоотдачи при переходе к третьему отрезку по сравнению с тем, которое имеет место при переходе от первого отрезка ко второму в процессе движения потока охлаждающего воздуха.

Кроме того, наборы ленточных выступов, которые имеются в третьем отрезке как переднего, так и заднего петлевых каналов на вторых по ходу потока участках 122cb, 124cb, имеют более высокие значения высоты выступов и отношения высоты выступов к шагу смещения, чем на первых участках 122ca, 124ca и чем в соответствующих наборах во втором отрезке 122b, 124b. Наборы ленточных выступов во втором отрезке 122b, 124b имеют такие значения высоты выступов и отношения этой высоты к шагу смещения выступов, которые превышают аналогичные характеристики для соответствующих характеристик выступов в первом отрезке 122a, 124a. Благодаря этому обеспечивается повышение эффективности теплоотдачи во втором и в третьем отрезках по направлению движения потока. Таким образом, данная конструкция лопатки обеспечивает баланс между необходимостью отбирать большее количество тепла от области передней кромки и необходимостью отводить меньшее количество тепла от средней части пера.

Третий канал 126, расположенный между входной кромкой 66 и третьим отрезком 122c переднего петлевого канала, имеет первый участок 126a, смежный с хвостовиком 58, и второй участок 126b, смежный с вершиной 56 пера. В третьем канале высота e выступа и отношение (e/p) высоты выступа к шагу p выступов выбраны большими, чем в первом отрезке переднего петлевого канала. Третий канал, в дополнение к переднему петлевому каналу, обеспечивает отвод тепла от области 68 входной кромки. Этот дополнительный отвод тепла предусматривается с учетом того, что передний петлевой канал получает большее количество тепла от средней части пера, поскольку в его первом отрезке (в отличие от заднего петлевого канала) имеются выступы.

Таким образом, повышенная способность отводить тепло, присущая более холодному воздуху в заднем петлевом канале, обусловлена конструкцией переднего петлевого канала и, в известной степени, наличием третьего канала. Как показано на фиг.9, наборы ленточных выступов в отрезках первого и второго петлевых каналов образуют своим передним краем острый угол с внутренней структурой пера, ограничивающей канал со стороны, которая ближе расположена к области соответствующей кромки. Это приводит к

тому, что часть охлаждающего воздуха течет в первом канале в сторону той внутренней структуры, которая расположена ближе к соответствующей кромке пера. Это также способствует увеличению способности отводить тепло в областях кромок пера лопатки. Третий канал содержит такие ленточные выступы, каждый из которых своей передней

5 стороной образует острый угол со вторым ребром для отвода в рабочих условиях части потока охлаждающего воздуха в направлении самого переднего ребра, ограничивающего передний петлевой канал. Таким образом, и в этом случае способность отводить тепло, присущая третьему каналу, дополняет аналогичную способность, присущую переднему петлевому каналу в области 68 входной кромки пера.

10 Хотя настоящее изобретение было описано на примерах его конкретных вариантов, для специалистов в данной области будет понятно, что в форму и детали осуществления изобретения могут быть внесены изменения, не выходящие за границы идеи и объема изобретения.

15 Формула изобретения

1. Охлаждаемая лопатка ротора для промышленной газотурбинной установки, имеющая передний контур для охлаждающего воздуха и задний контур для охлаждающего воздуха, причем перо лопатки имеет область входной кромки, область выходной кромки и среднюю область, расположенную между областями входной и выходной кромок, а также боковые

20 стенки, образующие спинку и корыто пера и соединяющиеся в области передней кромки и в области задней кромки с образованием полости между ними, через которую проходят, по меньшей мере, частично контуры для охлаждающего воздуха и в которой расположены первый, передний петлевой, канал и второй, задний петлевой, канал, у каждого из которых имеется отрезок, в котором поток направлен вверх, и участок, в котором поток

25 направлен вниз, при этом каждый указанный канал ограничен спинкой пера, корытом пера и смежной внутренней структурой пера, имеющей протяженность в продольном направлении и расположенной между указанными боковыми стенками, причем каждый петлевой канал имеет первый, второй и третий отрезки, последовательно соединенные между собой и взаимно ориентированные в продольном направлении, так что поток

30 охлаждающего воздуха, поступающий в рабочих условиях в соответствующий канал, последовательно проходит через указанные отрезки, начиная со средней области пера, от первого отрезка к третьему отрезку, расположенному в одной из областей входной или выходной кромок пера, с выпуском охлаждающего воздуха из указанного третьего отрезка, при этом лопатка ротора содержит: по меньшей мере, один набор ленточных выступов на

35 боковой стенке, образующей спинку пера и, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой стенке, образующей корыто пера и ограничивающей совместно с другой указанной боковой стенкой передний петлевой канал, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой стенке, образующей спинку пера и, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой стенке, образующей корыто пера и ограничивающей

40 совместно с другой указанной боковой стенкой, задний петлевой канал, причем указанные наборы ленточных выступов, образуют, по меньшей мере, два набора для каждого канала, при этом ленточные выступы каждого набора взаимно смещены в продольном направлении с заданным шагом, а также пространственно отделены и, по существу, параллельны смежным ленточным выступам того же набора на другой стенке, тогда как

45 каждый ленточный выступ находится внутри одного из отрезков соответствующего канала и характеризуется высотой выступа, измеряемой относительно смежной части боковой стенки, и отношением высоты выступа к шагу выступов для данного отрезка, причем каждый последующий отрезок каждого петлевого канала, расположенный по направлению потока за другим отрезком, по меньшей мере, на части своей длины, характеризуется

50 большим отношением высоты выступа к шагу выступов, чем предыдущий отрезок для повышения эффективности теплопередачи в каждом последующем отрезке по сравнению с предыдущим по мере приближения, в рабочих условиях, охлаждающего воздуха в каждом петлевом канале к области соответствующей кромки пера, тогда как шаг выступов для

каждого набора ленточных выступов в каждом канале, снабженном указанными выступами, за исключением третьего отрезка заднего петлевого канала, является постоянным для упрощения изготовления и контроля при обеспечении отвода тепла преимущественно от областей кромок по сравнению со средней областью.

5 2. Охлаждаемая лопатка ротора по п.1, отличающаяся тем, что каждый из первого, второго и третьего отрезков переднего петлевого канала, а также второго и третьего отрезков заднего петлевого канала содержит набор ленточных выступов.

3. Охлаждаемая лопатка ротора по п.1, отличающаяся тем, что у пера лопатки имеются входная и выходная кромки, а у каждого ленточного выступа имеется край, передний по отношению к потоку, тогда как внутренняя структура пера, имеющая протяженность в продольном направлении, имеет часть, примыкающую к соответствующей области кромки пера, а передний край каждого ленточного выступа в наборах, расположенных в отрезках переднего и заднего петлевых каналов, образует острый угол с указанной частью

10

указанной структуры для того, чтобы отклонить часть потока текучей среды в сторону

15

указанной структуры и тем самым в рабочих условиях преимущественно охлаждать области кромок пера.

4. Охлаждаемая лопатка ротора по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что указанная полость для охлаждающего воздуха имеет переднюю часть, в которой расположен передний петлевой канал, и заднюю часть, в которой расположен задний петлевой канал,

20

причем лопатка ротора содержит хвостовик, имеющий первый проход для охлаждающего воздуха, через который проходит передний контур для охлаждающего воздуха и который обеспечивает связь по потоку воздуха с передней частью полости для охлаждающего воздуха с целью подачи охлаждающего воздуха к каналу в области передней кромки и к переднему петлевому каналу, и второй проход для охлаждающего воздуха, через который

25

проходит задний контур для охлаждающего воздуха и который обеспечивает связь по потоку воздуха с задней частью полости для охлаждающего воздуха с целью подачи охлаждающего воздуха к заднему петлевому каналу, при этом каждый проход характеризуется средним поперечным сечением, измеряемым перпендикулярно соответствующему контуру на каждом участке по длине контура, и связан с камерой,

30

которая расположена смежно с указанной полостью и имеет поперечное сечение, превышающее среднее поперечное сечение расположенной перед ней частью указанного прохода, причем увеличение поперечного сечения выполнено для уменьшения скорости охлаждающего воздуха в рабочих условиях для повышения статического давления охлаждающего воздуха перед его поступлением внутрь пера и уменьшения потерь в

35

указанном проходе.

5. Охлаждаемая лопатка ротора по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что у пера лопатки имеются входная и выходная кромки, а также третий канал в области входной кромки, ориентированный в продольном направлении и расположенный между входной кромкой и передним петлевым каналом, причем передний контур для охлаждающего

40

воздуха выполнен раздвоенным для подачи части охлаждающего воздуха в передний петлевой канал, а части охлаждающего воздуха в третий канал в области входной кромки, который имеет, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой стороне пера, образующей спинку, и, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой

45

стороне пера, образующей корыто, с образованием в указанном третьем канале, по меньшей мере, двух наборов ленточных выступов, причем ленточные выступы на каждой из боковых сторон взаимно смещены относительно друг друга по длине пера с постоянным шагом и расположены с взаимным смещением по длине пера и параллельно относительно ленточных выступов на другой боковой стороне.

6. Охлаждаемая лопатка ротора по п.5, отличающаяся тем, что имеет хвостовик и

50

вершину, а каждый ленточный выступ в третьем канале характеризуется высотой выступа, измеряемой относительно смежной части боковой стенки, и отношением высоты выступа к шагу выступов, причем у третьего канала имеется первый участок, примыкающий к хвостовику, и второй участок, примыкающий к вершине и характеризующийся большими

значениями высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, чем у указанного первого участка.

7. Охлаждаемая лопатка ротора по п.1 или 2, отличающаяся тем, что у пера лопатки имеются входная и выходная кромки, а также третий канал, расположенный между входной кромкой и третьим отрезком переднего петлевого канала, а у каждого ленточного выступа имеется край, передний по отношению к потоку, образующий острый угол с примыкающей к нему внутренней структурой пера, ограничивающей указанный третий канал для того, чтобы отклонить в рабочих условиях часть потока текучей среды в сторону структуры пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей петлевой канал, ближайший к соответствующей области кромки.

8. Охлаждаемая лопатка ротора по п.1 или 2, отличающаяся тем, что передний край каждого ленточного выступа наборов ленточных выступов в отрезках переднего и заднего петлевых каналов образует острый угол с внутренней структурой пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей петлевой канал для того, чтобы отклонить в рабочих условиях часть потока текучей среды в сторону указанной структуры пера, ближайшей к соответствующей области кромки.

9. Охлаждаемая лопатка ротора по п.1 или 2, отличающаяся тем, что у каждого ленточного выступа имеется край, передний по отношению к потоку, и передние края ленточных выступов наборов, расположенных в отрезках переднего и заднего петлевых каналов, образуют острые углы с внутренней структурой пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей петлевой канал, ближайшей к соответствующей области кромки, для того, чтобы отклонить в рабочих условиях часть потока охлаждающего воздуха в сторону указанной структуры пера, ближайшей к соответствующей области кромки.

10. Охлаждаемая лопатка ротора по п.5, отличающаяся тем, что у лопатки имеются наружная и внутренняя поверхности, а у пера лопатки имеется вершинная зона, причем передний и задний петлевые каналы, а также третий канал вблизи входной кромки имеют выходные концы в вершинной зоне пера, сообщающиеся с соответствующими выпускными отверстиями, которые проходят через вершинную зону пера, сообщаясь с наружной поверхностью пера и тем самым обеспечивающие связь выходного конца каждого канала по потоку с наружной поверхностью пера, причем задняя стенка снабжена множеством охлаждающих отверстий, проходящих, по существу, в поперечном направлении через указанную стенку для того, чтобы обеспечить связь третьего отрезка заднего петлевого канала по потоку с наружной поверхностью пера.

11. Охлаждаемая лопатка ротора по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что ленточные выступы в третьих отрезках переднего и заднего петлевых каналов, по меньшей мере, на части этих отрезков имеют высоту, большую по сравнению с выступами в других отрезках того же канала.

12. Охлаждаемая лопатка ротора по п.11, отличающаяся тем, что передний и задний петлевые каналы имеют, по меньшей мере, на части своего третьего отрезка ленточные выступы, у которых значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов превышают аналогичные значения для ленточных выступов второго отрезка для того, чтобы в процессе протекания воздуха по заданному направлению через указанные каналы повышение эффективности теплопередачи указанными третьими отрезками по сравнению со вторыми отрезками было выше, чем аналогичное повышение эффективности для вторых отрезков по сравнению с первыми отрезками.

13. Охлаждаемая лопатка ротора по п.12, отличающаяся тем, что в третьем отрезке как переднего, так и заднего петлевых каналов имеются первый участок, к которому поступает охлаждающий воздух из второго отрезка, и второй участок, расположенный по ходу потока за первым участком, причем наборы ленточных выступов в третьем отрезке, расположенные на его втором участке, имеют значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышающие аналогичные значения в тех же наборах, расположенных на его первом участке, а также в наборах для второго отрезка того же

контура, при этом одна из характеристик наборов ленточных выступов во втором отрезке, представляющих собой значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышает аналогичную характеристику выступов в первом отрезке для того, чтобы обеспечить постепенное повышение эффективности теплопередачи вторых и

5 третьих отрезков последовательно по ходу потока охлаждающего воздуха.

14. Охлаждаемая лопатка ротора по п.11, отличающаяся тем, что в третьем отрезке как переднего, так и заднего петлевых каналов имеются первый участок, к которому поступает охлаждающий воздух из второго отрезка, и второй участок, расположенный по

10 ходу потока за первым участком, причем наборы ленточных выступов в третьем отрезке, расположенные на его втором участке, имеют значения высоты выступа и отношения

15 высоты выступа к шагу выступов, превышающие аналогичные значения в тех же наборах, расположенных на его первом участке, а также в наборах для второго отрезка того же контура, при этом одна из характеристик наборов ленточных выступов во втором отрезке, представляющих собой значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу

15 выступов, превышает аналогичную характеристику выступов в первом отрезке для того, чтобы обеспечить последовательное повышение эффективности теплопередачи вторых и третьих отрезков последовательно по ходу потока охлаждающего воздуха.

15. Охлаждаемая лопатка ротора по п.11, отличающаяся тем, что высота выступа и отношение высоты выступа к шагу выступов в наборах ленточных выступов в отрезках

20 переднего и заднего петлевых каналов, расположенных в первом и втором отрезках, не увеличиваются по всей длине отрезка для упрощения контроля и изготовления в процессе производства лопатки и для предотвращения роста помех потоку воздуха от одной части отрезка к следующей его части.

16. Охлаждаемая лопатка ротора по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что каждый

25 ленточный выступ имеет выпуклый цилиндрический вершинный участок с радиусом, составляющим половину высоты указанного выступа, и вогнутые участки, расположенные на передней и задней сторонах выступа, обеспечивающие переход по цилиндрической поверхности к боковой стенке канала и имеющие радиус, равный половине высоты ленточного выступа.

17. Охлаждаемая лопатка ротора по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что высота(е) ленточных выступов в первом, втором и третьем каналах выбрана в интервале, приблизительно составляющем 0,25-0,76 мм.

18. Охлаждаемая лопатка ротора для промышленной газотурбинной установки, имеющей в своем составе узел ротора, имеющая наружную поверхность и содержащая

35 хвостовик, обеспечивающий крепление лопатки ротора к роторному диску и имеющий стенку, ориентированную в поперечном направлении, первый проход для охлаждающего воздуха, обеспечивающий связь лопатки по потоку охлаждающего воздуха с источником указанного воздуха и включающий в себя первую камеру, первую проточную зону, расположенную по ходу потока перед первой камерой, и вторую проточную зону,

40 расположенную за камерой и имеющую больший объем, чем первая зона, и второй проход для охлаждающего воздуха, обеспечивающий связь лопатки по потоку охлаждающего воздуха с источником указанного воздуха и включающий в себя вторую камеру, первую проточную зону, расположенную по ходу потока перед второй камерой, и вторую проточную зону, расположенную за второй камерой и имеющую больший объем, чем первая зона,

45 перо с длиной (S), ориентированной в продольном направлении, имеющее передний петлевой канал, задний петлевой канал и ребра, расположенные между боковыми стенками, образующими спинку и корыто пера и ориентированные в продольном направлении с образованием внутренних структур пера, ориентированных в продольном направлении и ограничивающих в поперечном направлении каждый из указанных каналов,

50 имеющих по три отрезка, ориентированных в продольном направлении и ограниченных указанными ребрами, входную кромку, область входной кромки, а также выходную кромку и область выходной кромки, ориентированные в продольном направлении с пространственным смещением относительно входной кромки, среднюю область, имеющую

протяженность в продольном и поперечном направлениях и расположенную между областями входной кромки и выходной кромки, боковую стенку, образующую спинку пера и соединенную с боковой стенкой, образующей корыто пера для формирования внутренней структуры пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей в

5 поперечном направлении смежный с ней канал, причем указанная структура содержит переднюю стенку в области входной кромки и заднюю стенку в области выходной кромки, а спинка пространственно отделена от корыта в зоне между передней и задней стенками с образованием полости для подачи в нее охлаждающего воздуха, вершинную зону, имеющую верхнюю стенку, ориентированную в поперечном направлении и расположенную

10 между спинкой и корытом, первое ребро, которое расположено в средней области с ориентацией в продольном направлении, доходит до верхней стенки и разделяет полость на переднюю и заднюю части, причем в передней части полости имеются второе ребро, расположенное от стенки хвостовика до верхней стенки и пространственно отделенное от входной кромки с образованием между ней и указанным ребром третьего канала вблизи

15 входной кромки, состоящего из единственного отрезка, который связан по потоку с первым проходом для охлаждающего воздуха, третье ребро, отходящее от стенки хвостовика и пространственно смещенное в поперечном направлении от первого ребра с образованием между указанными ребрами первого отрезка переднего петлевого канала, причем третье ребро образует стенку второго отрезка указанного канала и

20 пространственно отделено в продольном направлении от верхней стенки зоной первого колена, соединяющего указанные первый и второй отрезки, и четвертое ребро, отходящее от верхней стенки, пространственно смещенное относительно третьего ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный второй отрезок, а также пространственно смещенное относительно второго ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный

25 третий отрезок, причем четвертое ребро пространственно отделено от стенки хвостовика зоной второго колена в переднем петлевом канале; в задней части полости имеются пятое ребро, отходящее от стенки хвостовика и пространственно смещенное в поперечном направлении от первого ребра с образованием между указанными ребрами первого отрезка заднего петлевого канала, причем пятое ребро образует стенку второго отрезка

30 указанного канала и пространственно отделено в продольном направлении от верхней стенки зоной первого колена, соединяющего указанные первый и второй отрезки заднего петлевого канала, и шестое ребро, отходящее от верхней стенки, пространственно смещенное относительно пятого ребра и ограничивающее, совместно с ним, указанный второй отрезок, а также пространственно смещенное относительно выходной кромки и

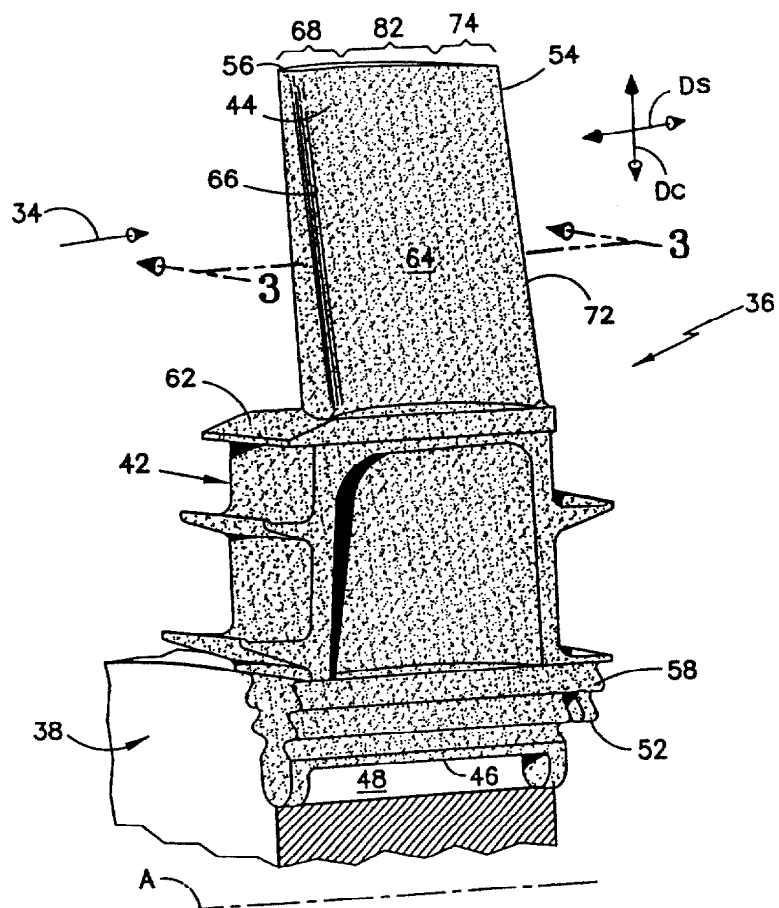
35 ограничивающее, совместно с ней, указанный третий отрезок, причем шестое ребро пространственно отделено от стенки хвостовика зоной второго колена в заднем петлевом канале; при этом первый проход для охлаждающего воздуха связан по потоку с передней частью указанной полости для подачи охлаждающего воздуха к каналу вблизи входной кромки и к переднему петлевому каналу, а второй проход для охлаждающего воздуха

40 связан по потоку с задней частью указанной полости для подачи охлаждающего воздуха к заднему петлевому каналу, тогда как камера, имеющаяся в составе каждого из указанных проходов, расположена смежно с указанной полостью и имеет поперечное сечение, превышающее среднее поперечное сечение расположенной перед ней частью указанного прохода, причем увеличение поперечного сечения выполнено для уменьшения скорости

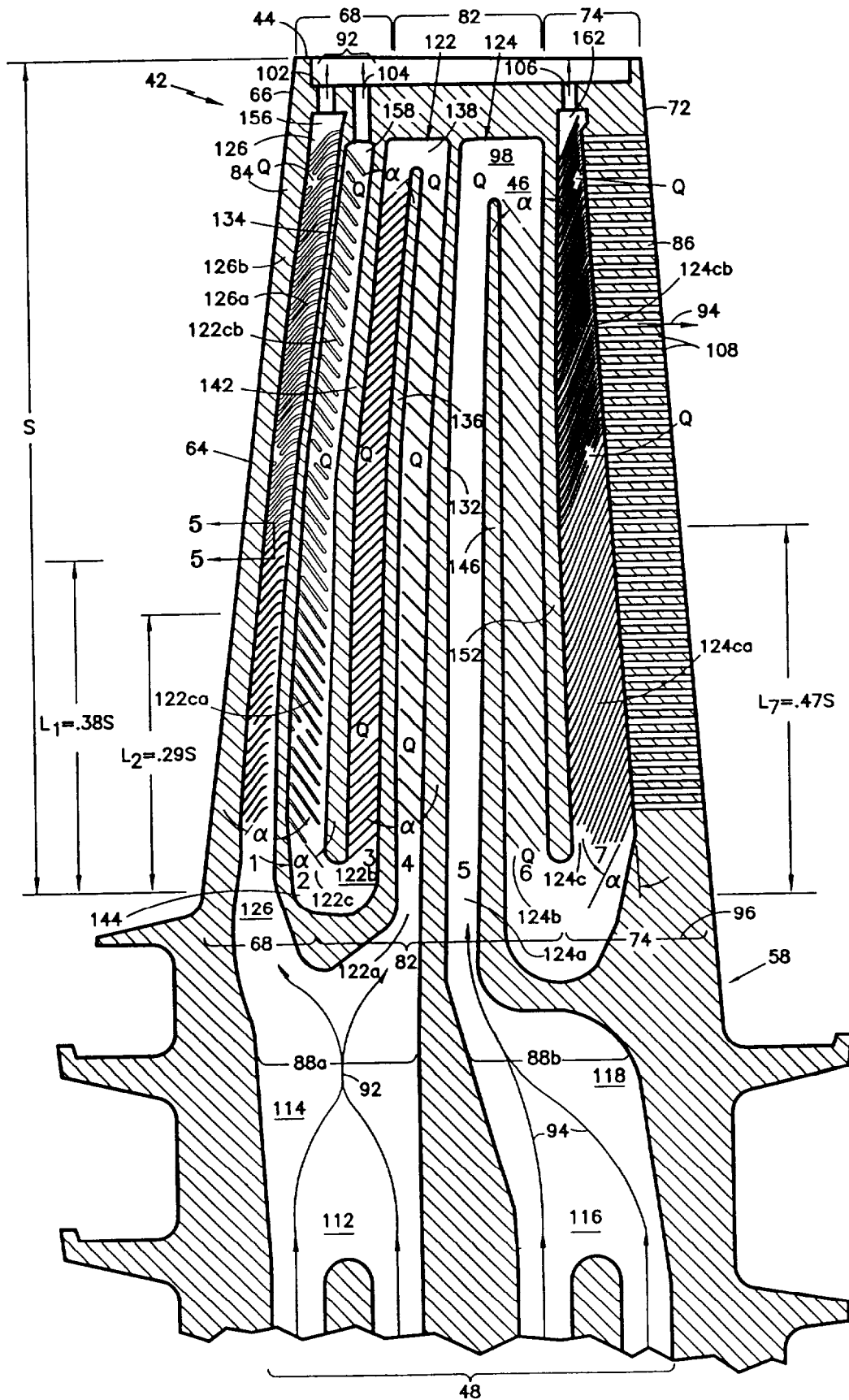
45 охлаждающего воздуха в рабочих условиях для повышения статического давления охлаждающего воздуха перед его поступлением внутрь пера и уменьшения потерь в указанном проходе; при этом передний и задний петлевые каналы, а также третий канал вблизи входной кромки имеют выходные концы в вершинной зоне пера, сообщающиеся с соответствующими выпускными отверстиями, которые проходят через вершинную зону

50 пера, сообщаясь с наружной поверхностью пера и тем самым обеспечивая связь выходного конца каждого канала по потоку с наружной поверхностью пера, причем задняя стенка снабжена множеством охлаждающих отверстий, проходящих, по существу, в поперечном направлении через указанную стенку для того, чтобы обеспечить связь

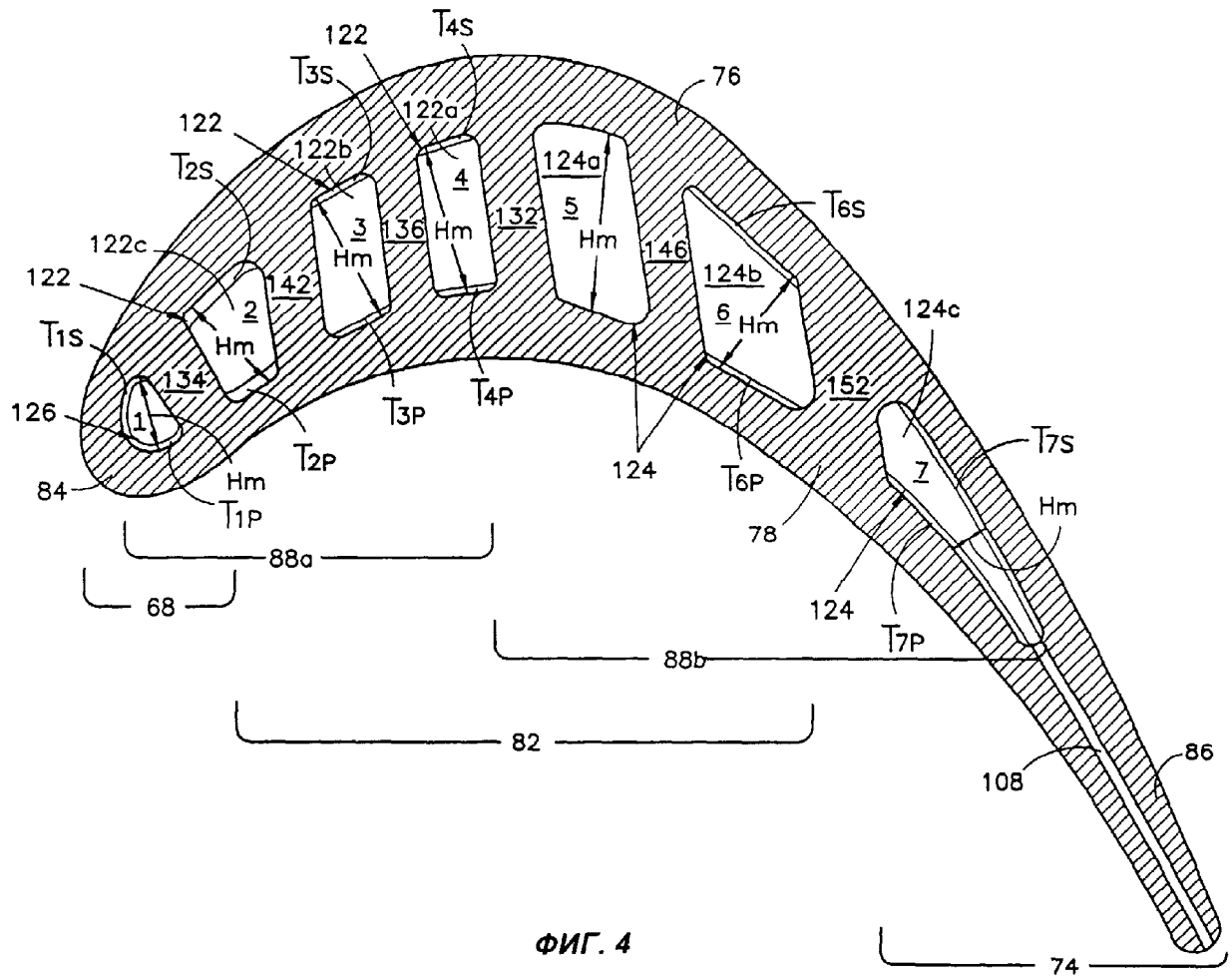
третьего отрезка заднего петлевого канала по потоку с наружной поверхностью пера; передний петлевой канал, задний петлевой канал и третий канал вблизи входной кромки содержат каждый, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой стенке, образующей спинку пера и, по меньшей мере, один набор ленточных выступов на боковой
 5 стенке, образующей корыто пера с образованием, по меньшей мере, двух наборов для каждого канала, причем ленточные выступы каждого набора взаимно смещены в продольном направлении с заданным шагом, а также пространственно отделены и, по существу, параллельны смежным ленточным выступам того же набора на другой стенке, тогда как каждый ленточный выступ характеризуется высотой выступа, измеряемой
 10 относительно смежной части боковой стенки, и отношением высоты выступа к шагу выступов для данного отрезка, при этом передний край каждого ленточного выступа образует острый угол с внутренней структурой пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей петлевой канал; у третьего канала, расположенного между входной кромкой и третьим отрезком переднего петлевого канала, имеется первый
 15 участок, примыкающий к хвостовику, и второй участок, примыкающий к вершине и характеризующийся большими значениями высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, чем у указанного первого участка, тогда как передний край каждого ленточного выступа в указанном канале образует острый угол со вторым ребром для того, чтобы отклонить в рабочих условиях часть потока охлаждающего воздуха в сторону ребра,
 20 которое является передним; передние края ленточных выступов наборов, расположенных в отрезках переднего и заднего петлевых каналов, образуют острые углы с внутренней структурой пера, ориентированной в продольном направлении и ограничивающей петлевой канал, ближайший к соответствующей области кромки, для того, чтобы отклонить в рабочих условиях часть потока охлаждающего воздуха в сторону указанной структуры
 25 пера, ближайшей к соответствующей области кромки; высота выступа и отношение высоты выступа к шагу выступов в наборах ленточных выступов в отрезках переднего и заднего петлевых каналов, расположенных в первом и втором отрезках, не увеличиваются по всей длине отрезка для упрощения контроля и изготовления в процессе производства пера лопатки; передний и задний петлевые каналы имеют, по меньшей мере, на части своего
 30 третьего отрезка, ленточные выступы, у которых значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов превышают аналогичные значения для ленточных выступов второго отрезка для того, чтобы в процессе протекания воздуха по заданному направлению через указанные каналы эффективность теплопередачи указанными третьими отрезками по сравнению со вторыми отрезками была выше, чем аналогичная
 35 эффективность для вторых отрезков по сравнению с первыми отрезками; в третьем отрезке как переднего, так и заднего петлевых каналов имеются первый участок, к которому поступает охлаждающий воздух из второго отрезка, и второй участок, расположенный по ходу потока за первым участком, причем наборы ленточных выступов в третьем отрезке, расположенные на его втором участке, имеют значения высоты выступа и отношения
 40 высоты выступа к шагу выступов, превышающие аналогичные значения в тех же наборах, расположенных на его первом участке, а также в наборах для второго отрезка того же контура, при этом одна из характеристик наборов ленточных выступов во втором отрезке, представляющих собой значения высоты выступа и отношения высоты выступа к шагу выступов, превышает аналогичную характеристику выступов в первом отрезке для того,
 45 чтобы обеспечить последовательное повышение эффективности теплопередачи вторых и третьих отрезков последовательно по ходу потока охлаждающего воздуха.



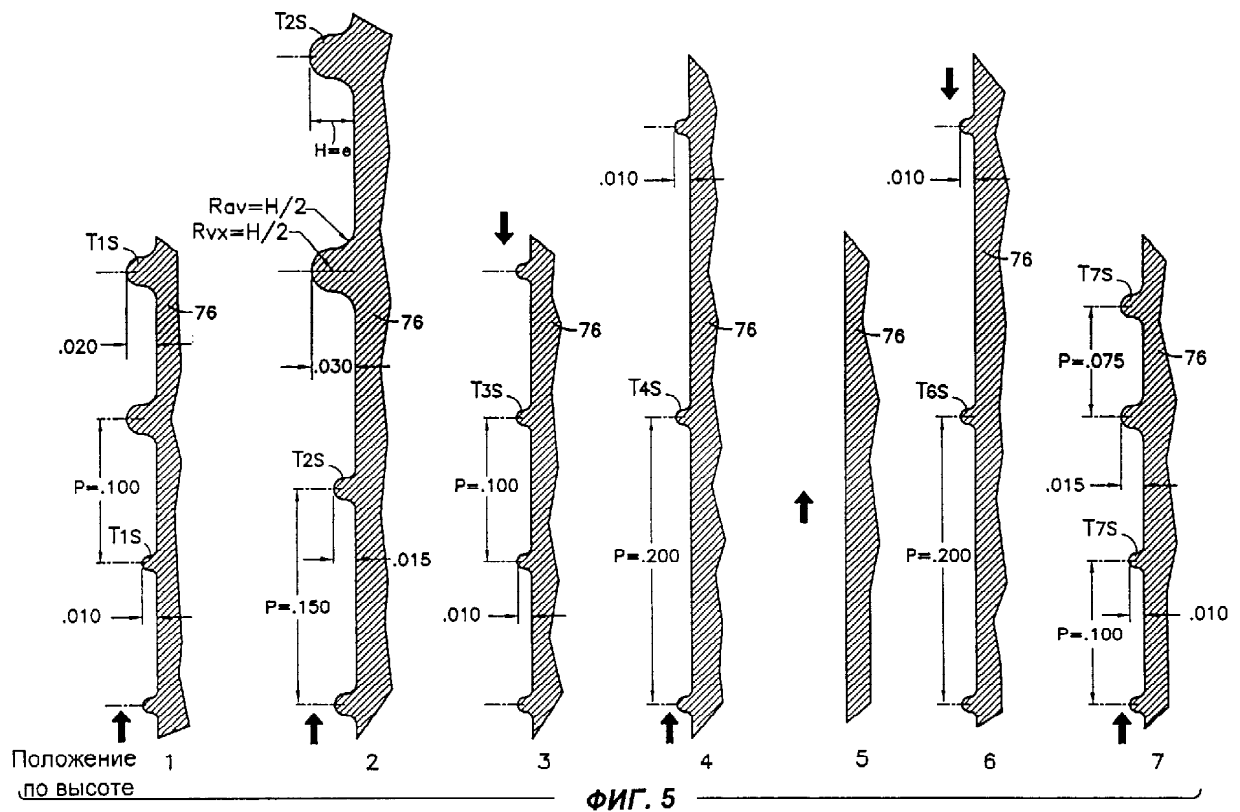
ФИГ. 2



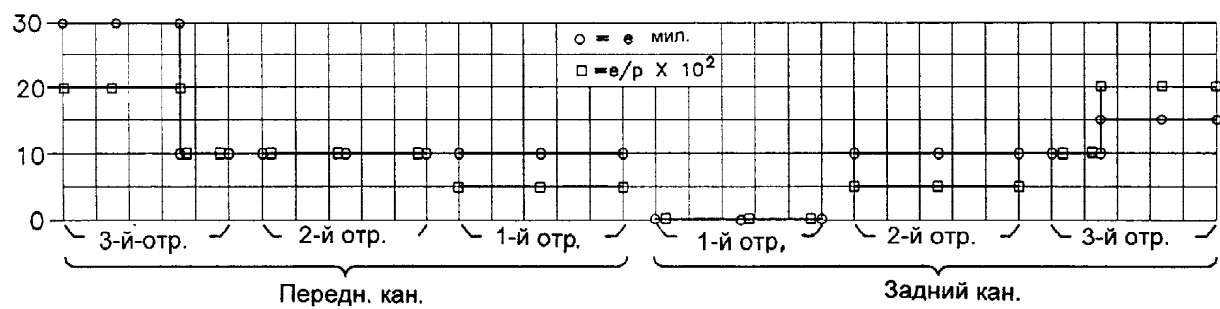
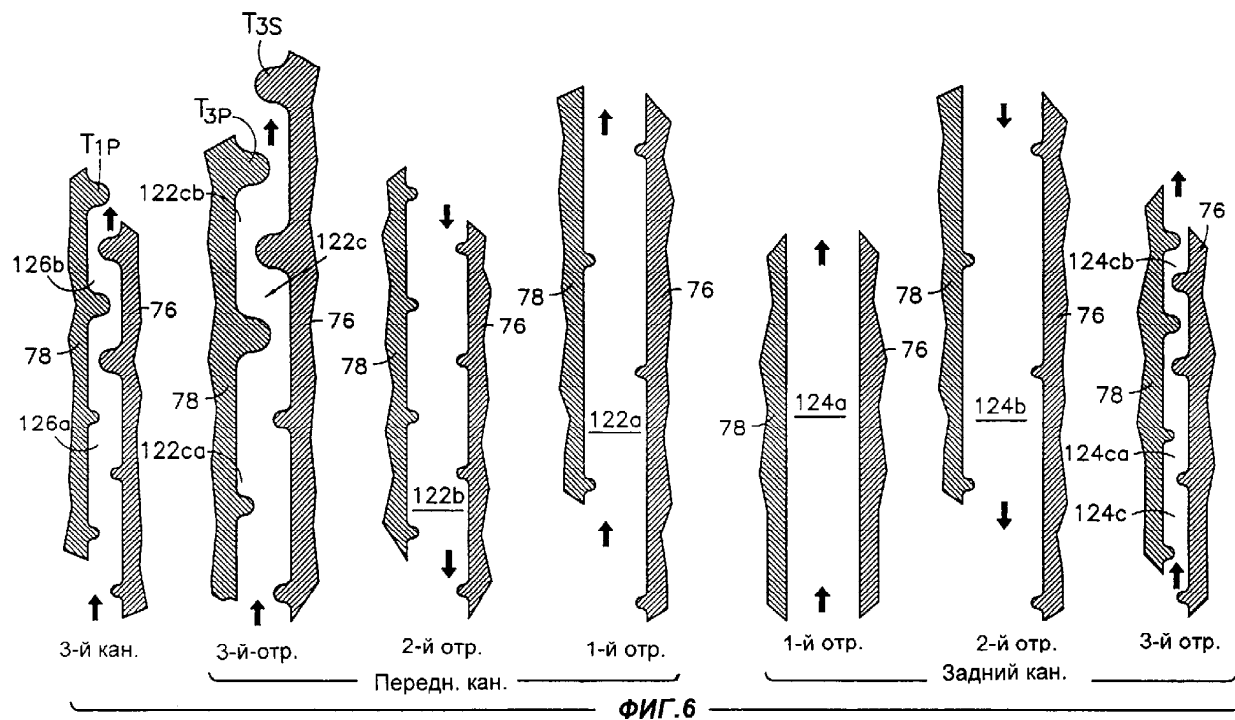
ФИГ. 3



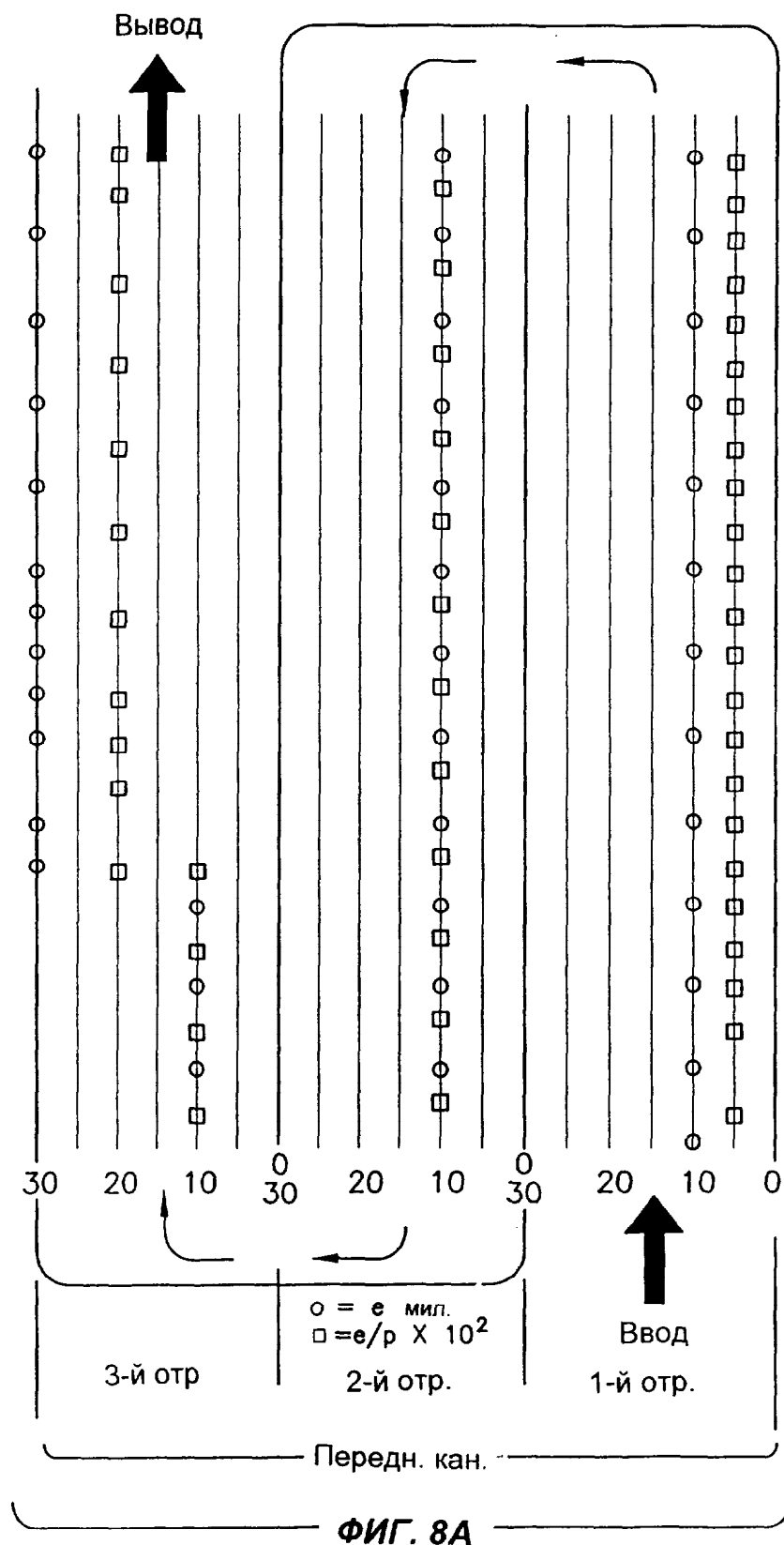
ФИГ. 4

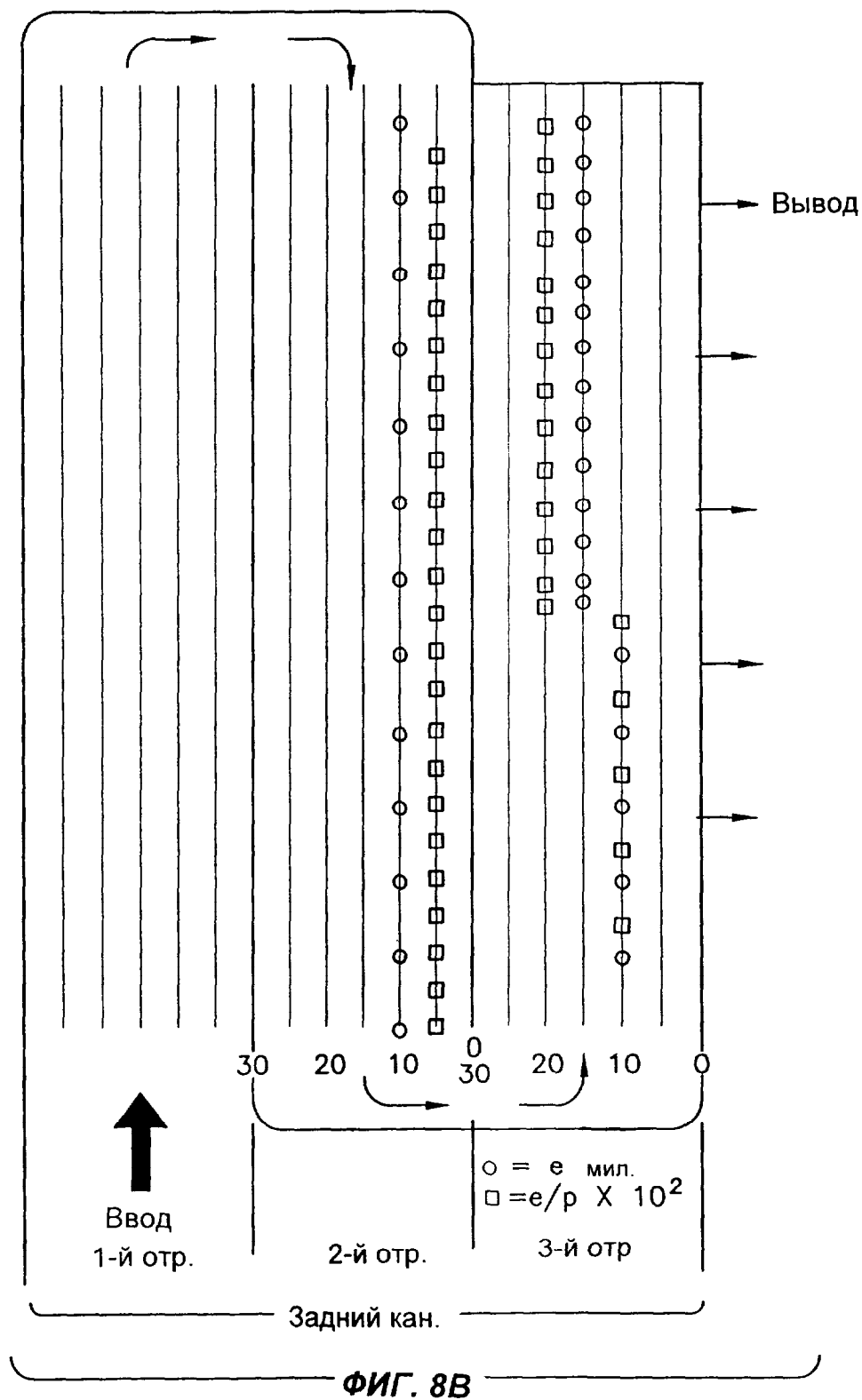


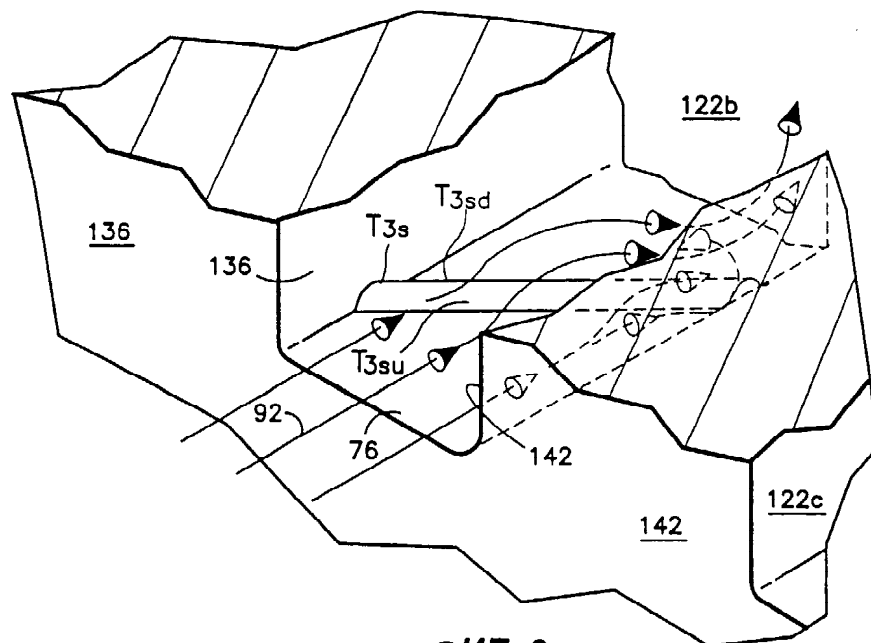
ФИГ. 5



ФИГ. 7







ФИГ. 9