



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F28F 3/00 (2018.08); F15D 1/10 (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2018107160, 26.02.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.02.2018

Дата регистрации:
24.12.2018

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 26.02.2018

(45) Опубликовано: 24.12.2018 Бюл. № 36

Адрес для переписки:
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, отдел интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Щукин Андрей Викторович (RU),
Ильинков Андрей Владиславович (RU),
Такмовцев Владимир Викторович (RU),
Хабибуллин Ильмир Ильдарович (RU),
Зарипов Ильнар Шавкатович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ" (КНИТУ-КАИ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2569540 C1, 27.11.2015. RU 2425260 C2, 27.07.2011. RU 2020304 C1, 30.09.1994. US 20130299036 A1, 14.11.2013.

(54) ТЕПЛООБМЕННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

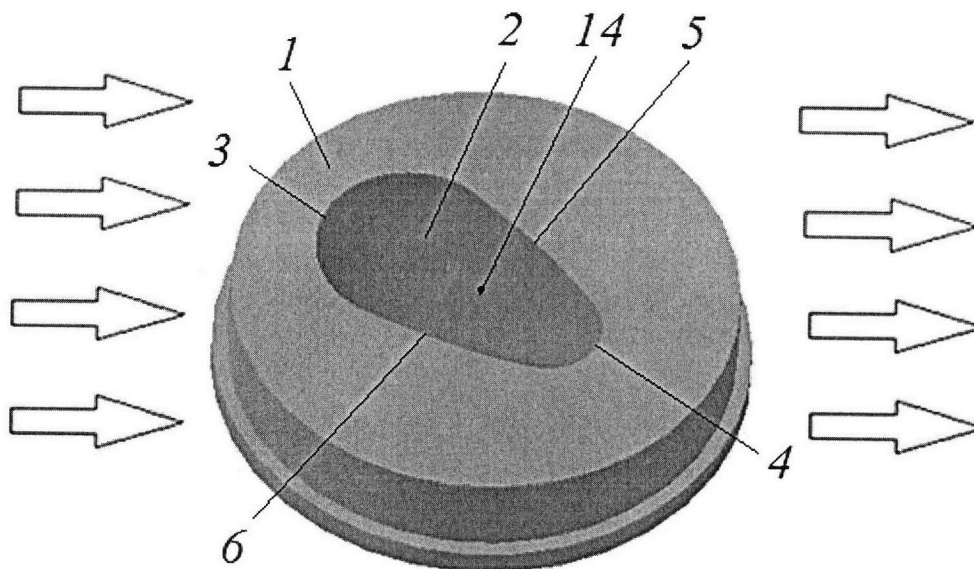
(57) Реферат:

Изобретение относится к теплоэнергетике, конкретно к теплообменным аппаратам, системам охлаждения промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей, и позволяет повысить эффективность охлаждения теплонапряженных элементов, увеличить ресурс их работы при упрощении технологии изготовления и снижении затрат в процессе производства. Теплообменная поверхность (1) содержит «отрывные» выемки (2) с переменной глубиной и шириной, каждая из которых в их продольной плоскости симметрии, в направлении движения внешнего потока теплоносителя, выполнена из двух плавно соединяющихся в донной части (14) входного диффузорного (7) и выходного конфузорного (8) участков. Выемки (2) в плане выполнены конфузорной формы от их входных (3) до выходных (4) кромок, соединенных боковыми

стенками (5) и (6) с углом конфузорности между ними $\alpha=30^\circ$, а продольная плоскость симметрии выемок повернута на угол $\beta=30^\circ\dots 45^\circ$ относительно направления движения вышеупомянутого внешнего потока теплоносителя. Входной диффузорный участок (7) занимает $1/3$ длины выемки (2) L до ее максимальной глубины h и соединен скруглением с входной кромкой (3) выемки по ее периметру радиусом $R_{вх}=h$, при этом отношение максимальной глубины выемки (2) к гидравлическому диаметру d_T в плане h/d_T на этом участке увеличивается от нуля до 0,44, выходной конфузорный участок (8) наклонен под углом $\gamma=22^\circ$ к исходно гладкой теплообменной поверхности (1), имеет протяженность, равную $(2/3)L$, соединен скруглением с выходной кромкой (4) выемки (2) по ее периметру радиусом $R_{вых}=0,25R_{вх}$, а величина h/d_T на этом участке

уменьшается от 0,44 до нуля. Боковые стенки
выемок и соединяющая их донная часть

выполнены вогнутыми с радиусом кривизны $R \approx (4...6)R_{вх}$. 4 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг. 1

RU 2675733 C1

RU 2675733 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
F28F 3/00 (2006.01)
F15D 1/10 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
F28F 3/00 (2018.08); F15D 1/10 (2018.08)

(21)(22) Application: **2018107160, 26.02.2018**

(24) Effective date for property rights:
26.02.2018

Registration date:
24.12.2018

Priority:

(22) Date of filing: **26.02.2018**

(45) Date of publication: **24.12.2018** Bull. № 36

Mail address:

**420111, g. Kazan, ul. K. Marksa, 10, KNITU-KAI,
otdel intellektualnoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Shchukin Andrej Viktorovich (RU),
Ilinkov Andrej Vladislavovich (RU),
Takmovtsev Vladimir Viktorovich (RU),
Khabibullin Ilmir Ildarovich (RU),
Zaripov Ilnar Shavkatovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Kazanskij natsionalnyj
issledovatel'skij tekhnicheskij universitet im.
A.N. Tupoleva-KAI" (KNITU-KAI) (RU)**

(54) **HEAT EXCHANGING SURFACE**

(57) Abstract:

FIELD: heat-and-power engineering.

SUBSTANCE: invention relates to a power system, specifically to heat exchangers, cooling systems for industrial gas turbine power plants and aircraft engines. Heat exchange surface (1) contains separated recesses (2) with variable depth and width, each of which, in their longitudinal plane of symmetry, in the direction of movement of the external coolant flow, is made of two smoothly connecting in bottom part (14) of input divergent (7) and output convergent (8) areas. Recesses (2) in plan are made of confused forms from their input (3) to the output (4) edges connected by side walls (5) and (6) with an angle of confusion between them $\alpha=30^\circ$, and the longitudinal plane of symmetry of the grooves is rotated with an angle $\beta=30^\circ\dots45^\circ$ relative to the direction of movement of the aforementioned external coolant flow. Input divergent area (7) occupies 1/3 of the length of recess (2) L to its maximum depth h and is connected by rounding to input edge (3) of the

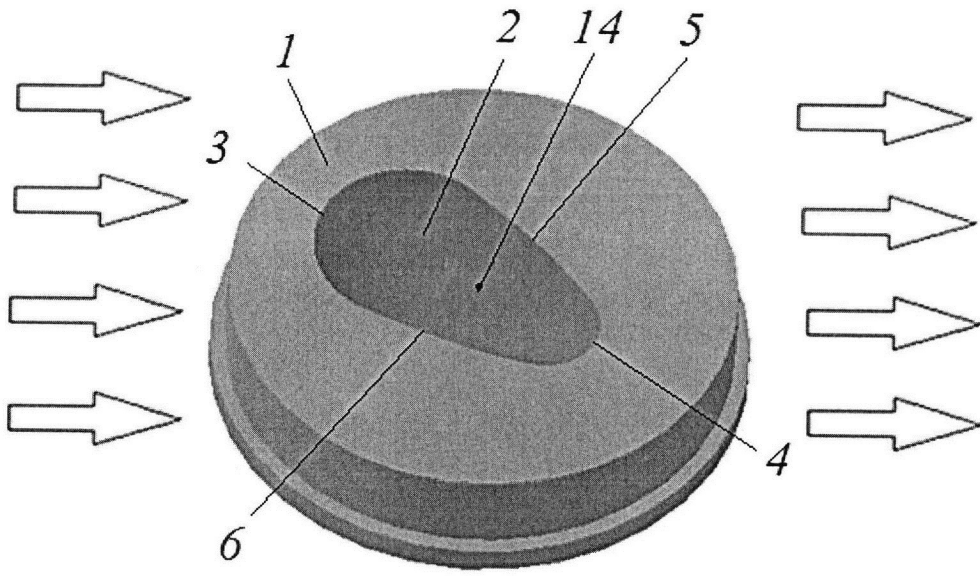
recess along its perimeter with a radius $R_{in}=h$, the ratio of the maximum depth of recess (2) to the hydraulic diameter d_g in terms of h/d_g in this area increases from zero to 0.44, output convergent area (8) is inclined at angle $\gamma=22^\circ$ to the initially smooth heat exchange surface (1), has a length equal to $(2/3)L$, is connected by rounding to input edge (4) of recess (2) along its perimeter with a radius $R_{out}=0.25R_{in}$, and the value of h/d_g in this area decreases from 0.44 to zero. Side walls of the grooves and the bottom part connecting them are concave with a radius of curvature $R \approx (4\dots6)R_{in}$.

EFFECT: invention allows to increase the cooling efficiency of heat-stressed elements, to increase the resource of their work while simplifying the manufacturing technology and reducing costs in the production process.

5 cl, 4 dwg

RU 2 675 733 C1

RU 2 675 733 C1



Фиг. 1

RU 2675733 C1

RU 2675733 C1

Изобретение относится к области теплоэнергетики, а конкретно к теплообменным аппаратам, системам охлаждения турбинных лопаток промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по определению рациональной формы выемок - интенсификаторов теплообмена, обеспечивающих, наряду с высокой теплоотдачей и сравнительно небольшими гидравлическими потерями, упрощение технологии изготовления теплообменной поверхности и удешевление процесса производства. Также большое внимание уделяется расположению выемок на теплообменной поверхности относительно направления движения потока и относительно друг друга.

Известно, что в теплоэнергетических установках для интенсификации конвективного теплообмена в системах охлаждения рабочих элементов наиболее целесообразно использовать «отрывные» выемки. Основным отличительным признаком «отрывных» выемок является их относительная глубина h/d_r , где h - максимальная глубина выемки, $d_r=4F/P$ - гидравлический диаметр выемки в плане. Здесь F - площадь выемки в плане, а P - ее периметр. «Отрывная» выемка ($h/d_r > 0,2$) создает самоорганизующиеся крупномасштабные вихревые структуры (СКВС), увеличивающие теплоотдачу и гидравлические потери: (см. монографию «Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов» / А.В. Шукин, А.П. Козлов, Р.С. Агачев, Я.П. Чудновский; под ред. акад. В.Е. Алемасова. Казань: Изд-во Казан, гос. Техн. Ун-та, 2003. - 143 с.

Известна работа по исследованию единичной асимметрично расположенной относительно движения внешнего потока теплоносителя овальной «отрывной» выемки: Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник Г.А, Исаев С.А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // Прикладна гідромеханіка. 2009. Том 11, №4. С. 31-46. Проведенные в этой работе эксперименты с различными углами β установки овальной «отрывной» выемки при ламинарном режиме течения набегающего внешнего потока теплоносителя при числе Рейнольдса $Re_d=4 \cdot 10^3$ показали, что наибольшая теплогидравлическая эффективность и формирование устойчивых вихревых структур в закрюночном следе выемки обеспечиваются при $\beta=60^\circ$ относительно направления набегающего потока.

В данной работе рассматривается ламинарный режим движения набегающего потока на овальную «отрывную» выемку, не соответствующий условиям, возникающим в системах охлаждения теплообменных аппаратов и, особенно, в системах охлаждения лопаток турбин промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей, где режим течения охладителя - турбулентный, а число Рейнольдса может достигать значений $Re_d=(40 \dots 80) \cdot 10^3$ и более.

Известна работа по исследованию установленных асимметрично относительно их продольной плоскости симметрии «отрывных» выемок овально-траншейного типа, используемых для интенсификации теплоотдачи на турбулентных режимах течения: Щелчков А.В. «Физическое и численное моделирование интенсификации теплообмена поверхностными генераторами вихрей в трактах систем охлаждения»: Автореф... дис. д-ра техн. наук. - Казань: КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2017. - 65 с. Проведенные в работе испытания элементов кожухотрубных теплообменных аппаратов транспортного оборудования в диапазоне чисел $Re_d=4 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ с овально-траншейными выемками, установленными под углом $\beta=45^\circ$ к набегающему потоку,

показали следующее. Предложенная овално-траншейная форма выемок относительно большого удлинения ($l_k/b=5,57$ и $l_k/b=6,78$, где l_k - длина вдоль оси, а b - ширина овално-траншейной выемки), наклоненная к потоку в плане под углом $\beta=45^\circ$, генерирует спиралевидную вихревую структуру с максимальной скоростью вторичного течения в канале порядка 80...100% от характерной (максимальной или среднемассовой скорости потока). Такой характер течения в интенсификаторах овално-траншейной формы в плане позволяет в два раза повысить относительную теплоотдачу, но только лишь в отрывной зоне, расположенной в верховье овално-траншейной выемки при увеличении в полтора раза абсолютной величины относительного трения.

Нанесение на теплообменную поверхность охлаждаемых лопаток турбин промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей асимметричных «отрывных» овално-траншейных выемок относительно большого удлинения приведет к образованию местных концентраторов напряжений и к снижению прочности материала турбинных лопаток, воспринимающих большие тепловые, динамические и вибрационные нагрузки.

Известна теплообменная поверхность с симметрично расположенными относительно ее продольной плоскости симметрии двухполостными диффузорными выемками (ДДВ): Патент №2569540 Российская Федерация, МПК F28F 3/00; F15D 1/10; опубл. 27.11.2015.

Каждая ДДВ представляет собой выемку с переменной глубиной и шириной, уменьшающимися в направлении движения основного потока теплоносителя, в которой выполнено ребро, расположенное вдоль основного потока в верхней по потоку части и образующее в возвратном течении две диффузорные полости внутри этой выемки, симметрично расположенные относительно ее ребра и ее продольной плоскости симметрии. При обтекании выемки внешним потоком в каждой из ее двух полостей происходит непрерывная во времени самоорганизация СКВС. Возвратное течение в обеих полостях приобретает диффузорный характер за счет диффузорной формы каналов, что приводит к повышению неустойчивости возвратного течения, интенсификации возникновения СКВС и интенсификации теплообмена в ДДВ.

Результаты экспериментального исследования как единичных моделей ДДВ, так и матрицы теплообменной поверхности с рельефом в виде ДДВ приведены в работе: Хабибуллин И.И. «Интенсификация теплообмена двухполостными диффузорными выемками»: Автореф...дис. канд. техн. наук. - Казань: КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2016. - 20 с. Полученные опытные данные показали сравнительно высокий уровень интенсификации теплоотдачи при использовании ДДВ, которые позволяют увеличить теплоотдачу более чем в 3 раза по сравнению с гладкой пластиной при высокой энергетической эффективности интенсификации теплообмена.

Технологичность изготовления таких выемок на теплообменной поверхности не высока, особенно при выполнении ребра, расположенного во внутренней полости ДДВ. Кроме того, наличие ребра, обтекаемого высокотемпературным потоком, может привести к возникновению повышенных температурных напряжений в этой зоне и к его тепловой деформации. В результате произойдет нарушение гидродинамических процессов образования и развития СКВС и, как следствие, снижение интенсификации теплообмена.

Известна теплообменная поверхность с интенсификаторами теплообмена, выполненными в виде «отрывных» сферических выемок, наиболее близкая по технической сущности к заявляемому изобретению и принятая за прототип. Происходящие в «отрывных» сферических выемках физические процессы и результаты их внедрения опубликованы в монографии «Теплогидравлическая эффективность

перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена»: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. - Казань: Центр инновационных технологий, 2009. - 531 с.

5 Технология изготовления этих выемок наиболее проста по сравнению с другими формами выемок, отработана и не требует значительных финансовых затрат.

Результаты экспериментального и теоретического исследования гидродинамических процессов в «отрывных» сферических выемках показывают, что в выемках этого типа существует одна СКВС, которая возникает последовательно то в одном, то в другом
10 эпицентре выемки. Имеет место дискретный во времени характер выхода этих вихревых структур из сферических выемок на исходно гладкую плоскую теплообменную поверхность между выемками. В результате примерно 45% времени вихрь существует в одном эпицентре, 45% времени - в другом, и около 10% времени занимает процесс переброски вихревой структуры из одного эпицентра в другой.

15 Авторы многочисленных исследований считают, что причиной образования СКВС в «отрывных» сферических выемках является неустойчивость образующегося на вогнутой поверхности выемки пограничного слоя. Активное воздействие центробежных массовых сил приводит к образованию в ламинарном подслое микровихрей Тэйлора-Гертлера, которые провоцируют дискретно возникающие в выемке смерчеобразные
20 структуры.

Отсюда следует, что основной причиной интенсификации теплообмена на плоских участках поверхности между выемками являются эти СКВС, выходящие из выемок и присоединяющиеся к поверхности за выемкой.

В «отрывных» сферических выемках скорость возвратного течения мала и
25 отсутствуют факторы, интенсифицирующие конвективный процесс переноса теплоты. Это приводит к тому, что коэффициент теплоотдачи в выемках ниже, чем при обтекании исходно гладкой поверхности. Кроме того, эффективность повышения теплоотдачи в «отрывных» сферических выемках значительно ниже, чем в ДДВ.

Технической проблемой, на решение которой направлено предлагаемое изобретение,
30 является повышение эффективности интенсификации конвективного теплообмена в теплообменниках различного типа, в системах охлаждения турбинных лопаток промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей.

Технический результат, на достижение которого направлено предлагаемое изобретение, заключается в увеличении теплоотдачи около теплообменной поверхности
35 в «отрывных» конфузорных выемках (далее по тексту - выемках) асимметрично установленных относительно движения внешнего потока теплоносителя, обладающих возможностью непрерывной генерации СКВС внутри выемки, при более простой и дешевой технологии изготовления. Это позволит повысить эффективность охлаждения теплонапряженных элементов, увеличить ресурс их работы при упрощении технологии
40 изготовления и снижении затрат в процессе производства.

Технический результат достигается тем, что на теплообменной поверхности, содержащей «отрывные» выемки с переменной глубиной и шириной, каждая из которых в их продольной плоскости симметрии, в направлении движения внешнего потока теплоносителя, выполнена из двух плавно соединяющихся в донной части входного
45 диффузорного и выходного конфузорного участков, новым является то, что выемки в плане выполнены конфузорной формы от их входных до выходных кромок, соединенных боковыми стенками, при этом продольная плоскость симметрии выемок повернута на угол $\beta=30^\circ \dots 45^\circ$ относительно направления движения вышеупомянутого

внешнего потока теплоносителя.

Входной диффузорный участок занимает $1/3$ длины выемки L до ее максимальной глубины h и соединен скруглением с входной кромкой выемки по ее периметру радиусом $R_{\text{вх}}=h$, при этом отношение максимальной глубины выемки к гидравлическому диаметру d_T в плане h/d_T на этом участке увеличивается от нуля до $0,44$, выходной конфузорный участок имеет протяженность, равную $(2/3)L$, соединен скруглением с выходной кромкой выемки по ее периметру радиусом $R_{\text{вых}}=0,25R_{\text{вх}}$, а величина h/d_T на этом участке уменьшается от $0,44$ до нуля.

Выходной конфузорный участок выемки в донной части наклонен под углом $\gamma=22^\circ$ к ее исходно гладкой поверхности.

Угол конфузорности между боковыми стенками выемок в направлении от входной к выходной кромкам составляет $\alpha=30^\circ$.

Боковые стенки выемок и соединяющая их донная часть выполнены вогнутыми с радиусом кривизны $R \approx (4 \dots 6)R_{\text{вх}}$.

Предложенное изобретение представлено на фиг. 1-4 где:

Фиг. 1. - 3D модель выемки на теплообменной поверхности;

Фиг. 2 - выемка на теплообменной поверхности в плане;

Фиг. 3 - сечение А-А в продольной плоскости симметрии выемки;

Фиг. 4. - значения относительного числа Нуссельта ($Nu/Nu_{\text{гд}}$), характеризующие интенсификацию теплообмена относительно исходно гладкой поверхности при использовании «отрывных» выемок: сферических; конфузорных; ДДВ (расположенных слева направо).

На фиг. 1-3 большими стрелками показано направление движения внешнего потока теплоносителя, а малыми стрелками обозначено движение части внешнего потока теплоносителя, попадающего внутрь выемок.

Где:

1 - теплообменная поверхность.

2 - выемка.

3 - входная кромка выемки по направлению движения внешнего потока теплоносителя.

4 - выходная кромка выемки по направлению движения внешнего потока теплоносителя.

5 - левая (по направлению движения внешнего потока теплоносителя) боковая стенка выемки, соединяющая ее входную и выходную кромки.

6 - правая (по направлению движения внешнего потока теплоносителя) боковая стенка выемки, соединяющая ее входную и выходную кромки.

7 - входной диффузорный участок выемки в ее продольной плоскости симметрии.

8 - выходной конфузорный участок выемки в ее продольной плоскости симметрии.

9 - часть внешнего потока теплоносителя, попадающего внутрь выемки и обтекающего поверхность входного диффузорного участка в направлении, совпадающим с направлением движения внешнего потока теплоносителя.

10 - «отрывной» поток, генерирующийся на входном участке и попадающий внутрь выемки на выходном участке.

11 - спутный поток, формирующийся на выходном участке выемки, в направлении движения внешнего потока теплоносителя.

12 - возвратный поток, формирующийся на выходном участке выемки в ее донной части, в направлении противоположном движению внешнего потока теплоносителя.

13 - СКВС, возникающая в области разрежения на стенке входного участка выемки и формирующая спутный поток, покидающий выемку в направлении движения внешнего потока теплоносителя.

14 - донная часть выемки, образованная плавно соединяющимися входным 7 и выходным 8 участками.

Б - область отрыва потока в области угловой точки между исходно гладкой поверхностью и входным участком выемки.

В - область присоединения части внешнего потока теплоносителя на выходном участке выемки, где формируется возвратное диффузорное течение.

Г - эпицентр образования СКВС на дне выемки.

L - длина выемки.

h - максимальная глубина выемки.

$R_{вх}$ - радиус входной кромки выемки.

$R_{вых}$ - радиус выходной кромки выемки.

$\alpha=30^\circ$ - угол конфузорности выемки в плане по направлению движения внешнего потока теплоносителя.

$\beta=30...45^\circ$ - угол установки продольной плоскости симметрии выемки относительно направления движения внешнего потока теплоносителя.

$\gamma=22^\circ$ - угол наклона выходного участка в донной части выемки к направлению движения внешнего потока теплоносителя в продольной плоскости симметрии выемки.

w_0 - скорость внешнего потока теплоносителя.

Теплообменная поверхность работает следующим образом.

При подаче воздуха, другого газа или жидкости на теплообменную поверхность 1 (фиг. 1-3) матрицы, на которой расположены «отрывные» выемки 2 конфузорной формы в плане и имеющие переменную глубину и ширину происходят следующие гидродинамические процессы. Внешний поток теплоносителя движется вдоль матрицы с выемками 2 в направлении, указанном большими стрелками. Структура этого потока определяется формой выемок 2 и режимными условиями их обтекания.

Часть внешнего потока теплоносителя 9 (используется обозначение маленькими стрелками) поступает в выемку 2 (фиг. 3) через ее входную кромку 3 (фиг. 1, 2) и обтекает входной диффузорный участок 7 (фиг. 3), попадая в зону максимальной глубины выемки, подпитывая своей кинетической энергией СКВС 13 (фиг. 2, 3), возникающую в этой области.

Другая часть внешнего потока теплоносителя 10 (фиг. 3), попадая во входной диффузорный участок 7 непосредственно за линией входной кромки 3 (фиг. 1, 2), генерирует поток, область отрыва которого на фиг.2, 3 обозначена буквой (Б).

Присоединение потока 10 происходит в области выходного участка 8 (фиг. 3) около выходной кромки 4 (фиг. 1, 2). Область присоединения потока 10 обозначена буквой (В).

После присоединения поток 10 делится на две части. Одна его часть образует спутный поток 11 (фиг. 3), покидающий выемку 2 в направлении движения внешнего потока теплоносителя. Другая часть потока 10 разворачивается примерно на 180° и течет в обратном направлении вдоль левой боковой стенки 5 (фиг. 1, 2) выемки 2, формируя возвратный поток 12 (фиг. 2, 3). Известно (см. монографию «Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел» / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. - Киев: Наукова думка, 1982. - 303 с), что на этом участке от области присоединения (В) по ходу возвратного течения вдоль левой боковой стенки 5 (фиг. 2) и выходного участка 8 (фиг. 3) выемки 2 значение

скорости возвратного потока теплоносителя 12 при увеличении расстояния от области присоединения (В) сначала увеличивается, а потом уменьшается, что свойственно потокам и струям после присоединения к обтекаемой поверхности. В нашем случае снижение скорости возвратного течения обусловлено как релаксацией

5 присоединяющегося к поверхности потока, так и диффузорной формой канала при возвратном течении потока 12.

У донной поверхности 14 (см. фиг. 1, 2) выемки 2 возвратный поток 12 (см. фиг. 2, 3) направляется к эпицентру образования СКВС 13, обозначенному буквой (Г), где эти вихревые структуры 13 генерируются во времени непрерывно, что является

10 принципиальным и важнейшим для достижения технического результата изобретения фактором, отличающим заявляемую схему выемки от прототипа, где эти СКВС образуются дискретно во времени, с чередующейся сменой местоположения эпицентров СКВС.

Как было отмечено выше, движение возвратного потока 12 (см. фиг. 2 и 3) происходит

15 как вдоль левой боковой стенки 5, так и непосредственно вдоль донной части 14 выемки 2. Левая 5 и правая 6 боковые стенки формируют конфузорность выемки 2 в плане и расположены под углом $\alpha=30^\circ$ друг к другу. Скругление выходной кромки (см. фиг. 2 и 3) радиусом $R_{\text{вых}}=0,25R_{\text{вх}}$ способствует формированию возвратного потока 12. В этом случае СКВС 13 в процессе своего непрерывного функционирования охватывает

20 практически всю площадь поверхности входного участка 7 выемки 2. Мощность и интенсивность этих СКВС 13 во многом определяется наличием микроотрывов и микропульсаций в пристенном слое возвратного потока 12 в выемке.

В заявляемом изобретении для генерации этих пристенных возмущений предусмотрены диффузорная форма полости выемки 2 для возвратного потока 12 (см.

25 фиг. 2, 3), образуемая боковыми левой 5 и правой 6 стенками и донной поверхностью 14, а также их вогнутой формой с радиусом кривизны $R \approx (4 \dots 6)R_{\text{вх}}$. Значение радиуса кривизны R задано исходя из условия образования на боковых стенках 5 и 6 выемок 2 и их донной части 14 микровихрей Тэйлора-Гертлера, которые поглощаются СКВС и увеличивают их мощность и интенсивность теплообмена. Для этого выходной участок

30 8 выемки 2 в донной ее части наклонен под углом $\gamma=22^\circ$ к ее исходно гладкой поверхности 1. Асимметричное расположение эпицентра СКВС в точке «Г» на донной части 14 выемки 2 относительно продольной плоскости симметрии связано с асимметричностью расположения этой продольной плоскости симметрии выемки

35 относительно внешнего потока, что приводит к возникновению сил инерции в возвратном течении, смещающих эпицентр СКВС в сторону от продольной плоскости симметрии выемки.

Длина L предложенной «отрывной» конфузорной выемки 2 (фиг. 2, 3) выбрана исходя из результатов проведенных авторами экспериментов, на основе которых

40 предопределено присоединение оторвавшегося на входном диффузорном участке 7 непосредственно за линией входной кромки 3 потока 10 теплоносителя в пределах выходного конфузорного участка 8 около выходной кромки 4 выемки 2. Этим же условиям удовлетворяют выбранные в продольной плоскости симметрии выемки 2 продольные размеры входного диффузорного 7 и выходного конфузорного 8 участков.

45 Входной диффузорный участок 7 занимает 1/3 длины выемки L до ее максимальной глубины h и соединен скруглением с входной кромкой 3 выемки 2 по ее периметру радиусом $R_{\text{вх}}=h$, при этом отношение максимальной глубины выемки 2 к гидравлическому диаметру d_T в плане h/d_T на этом участке увеличивается от нуля до

0,44. Выходной конфузорный участок имеет протяженность, равную $(2/3)L$, соединен скруглением с выходной кромкой 4 выемки 2 по ее периметру радиусом $R_{\text{ВЫХ}}=0,25R_{\text{ВХ}}$, а величина h/d_r на этом участке уменьшается от 0,44 до нуля.

Экспериментально было исследовано влияние величины угла P (см. фиг. 2) установки продольной плоскости симметрии выемки относительно направления движения внешнего потока теплоносителя на процесс возникновения на входном участке 7 (см. фиг. 3) выемки 2 непрерывно действующей во времени СКВС 13. Опыты проводились при следующих значениях углов: $\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Во всех случаях угол конфузорности выемки в плане по направлению движения основного потока теплоносителя оставался постоянным и составлял $\alpha=30^\circ$. Сравнительные эксперименты проводились при числе Рейнольдса, рассчитанном по гидравлическому диаметру d_r

выемки в плане: $Re_d=w_0\rho d_r/\mu=2,7\cdot 10^4$. Анализ результатов экспериментального исследования осуществлялся по величине коэффициента давления C_p , который определялся по формуле

$$C_p=(p_i-p_0)/(\rho_0w_0^2)/2,$$

где p_i и p_0 - статическое давление в i -й точке поверхности выемки и статическое давление перед выемкой; ρ_0 и w_0 - плотность и скорость внешнего потока теплоносителя.

Результаты сравнительного анализа полученных опытных данных показали, что оптимальным углом установки выемки как с точки зрения генерации наиболее мощной СКВС и обеспечения более высокого разряжения в области ее эпицентра на поверхности входного участка у входной кромки, так и размещения зоны присоединения потока к донной поверхности выходного участка до выходной кромки, а также умеренного роста гидравлических потерь на диффузорных участках является угол $\beta=30\dots 45^\circ$. В этом случае коэффициент давления достигает значения $C_p \approx (-0,4)$, что характеризует наиболее высокий уровень разрежения в области СКВС. Уменьшение угла установки продольной плоскости симметрии выемки от выбранного авторами изобретения рационального диапазона изменения значения $30^\circ < \beta < 45^\circ$ до значения $\beta=0^\circ$ приводит к снижению мощности СКВС. В области же более высоких значений углов β относительно указанного выше диапазона выбранных значений β увеличивается гидравлическое сопротивление обтекания матрицы с предложенными авторами изобретения выемками.

Как показали эксперименты, проведенные авторами изобретения, при числе Рейнольдса $Re_d < 1,5\cdot 10^4$ мощность СКВС, судя по значениям коэффициента давления C_p , снижается в несколько раз. Этот результат позволяет установить нижний предел числа Рейнольдса по применимости предлагаемого интенсификатора теплообмена. Верхний предел его использования в практически важном диапазоне эксплуатации в системах охлаждения двигателей и энергетических установок различного назначения не существует, поскольку примерно при $Re_d > 2\cdot 10^4$ наступает автомоделный режим по числу Рейнольдса с его стабильными режимными параметрами и при более высоких значениях Re .

Анализ гидродинамических экспериментов показал, что предлагаемое изобретение позволяет снизить по сравнению с ДДВ гидравлические потери примерно в 1,2...1,3 раза. Кроме этого, предлагаемое изобретение позволяет существенно повысить теплоотдачу в «отрывных» конфузорных выемках по сравнению со сферическими «отрывными» выемками, выбранными в качестве прототипа. Установленный факт

высокого уровня разрежения на поверхности выемки в области эпицентра СКВС способствует генерации интенсивного массообмена между выемкой и обтекающим ее внешним потоком теплоносителя. Опыты показали (см. фиг. 4), что прирост теплоотдачи достигает примерно двукратного значения по сравнению с теплоотдачей на исходной гладкой пластине (на графике величина этой теплоотдачи принята за 1) с учетом увеличения площади теплообмена при одинаковых входных условиях и числах Рейнольдса. Отметим, что при обтекании «отрывных» сферических выемок при прочих равных условиях этот прирост составляет 2...2,3 раза, а в ДДВ - 3,5...3,8 раза. То, что прирост теплоотдачи в «отрывной» конфузорной выемке несколько меньше, чем в ДДВ, что свидетельствует о том, что основным фактором интенсивного массообмена и конвективного теплообмена в таких выемках является СКВС. Ведь доля площади поверхности, занимаемая СКВС в ДДВ несколько выше, чем в «отрывной» конфузорной выемке.

Отсюда следует вывод о том, что не следует удлинять исследованные нами образцы «отрывных» конфузорных выемок, поскольку теплоотдача при этом только уменьшится. Получается, что кроме всего прочего, предлагаемое изобретение помогает решить одну из важнейших задач совершенствования пристенных интенсификаторов теплообмена - увеличить вклад СКВС в общий прирост теплоотдачи на обтекаемой поверхности с выемками.

Таким образом, изобретение позволяет повысить теплоотдачу по сравнению с традиционными «отрывными» сферическими выемками, используя ту же технологию изготовления, которая отработана в производстве и не представляет больших затруднений, например, штамповка, фрезеровка, сверление - для теплообменников, или литье по выплавляемым моделям - для турбинных лопаток промышленных газотурбинных энергоустановок и авиационных двигателей. При этом прирост теплоотдачи в «отрывных» конфузорных выемках незначительно уступает ДДВ, выбранных в качестве аналога, технология изготовления которых существенно более сложная по сравнению с известными и более дешевыми технологическими процессами по причине обязательного наличия ребра-разделителя полостей. В то же время, предлагаемое изобретение позволяет уменьшить гидравлические потери по сравнению с этим аналогом - теплообменной поверхностью с ДДВ, что особенно актуально в настоящее время при разработке современных вихревых генераторов, к которым предъявляется важное требование повышения теплоотдачи при меньших гидравлических потерях. Что касается прототипа, то при практически одинаковой по сложности технологии изготовления, заявляемый вариант «отрывной» конфузорной выемки примерно в полтора раза превышает уровень интенсификации теплообмена на поверхности с «отрывными» сферическими выемками при прочих равных условиях. Увеличение мощности теплового потока в выемке с меньшими гидравлическими потерями позволяет создавать компактные, энергоэффективные, более технологичные в производстве, а, следовательно, и более дешевые теплообменные поверхности конструктивных элементов в различных теплообменных аппаратах, промышленных газотурбинных энергоустановках и авиационных двигателях.

(57) Формула изобретения

1. Теплообменная поверхность, содержащая «отрывные» выемки с переменной глубиной и шириной, каждая из которых в их продольной плоскости симметрии, в направлении движения внешнего потока теплоносителя, выполнена из двух плавно соединяющихся в донной части входного диффузорного и выходного конфузорного

участков, отличающаяся тем, что выемки в плане выполнены конфузальной формы от их входных до выходных кромок, соединенных боковыми стенками, при этом продольная плоскость симметрии выемок повернута на угол $\beta=30^\circ \dots 45^\circ$ относительно направления движения вышеупомянутого внешнего потока теплоносителя.

5 2. Теплообменная поверхность по п. 1, отличающаяся тем, что входной диффузорный участок занимает $1/3$ длины выемки L до ее максимальной глубины h и соединен скруглением с входной кромкой выемки по ее периметру радиусом $R_{\text{вх}}=h$, при этом отношение максимальной глубины выемки к гидравлическому диаметру d_T в плане h/d_T на этом участке увеличивается от нуля до $0,44$, выходной конфузальной участок имеет протяженность, равную $(2/3)L$, соединен скруглением с выходной кромкой выемки по ее периметру радиусом $R_{\text{вых}}=0,25R_{\text{вх}}$, а величина h/d_T на этом участке уменьшается от $0,44$ до нуля.

10 3. Теплообменная поверхность по п. 1, отличающаяся тем, что выходной конфузальной участок выемки в донной части наклонен под углом $\gamma=22^\circ$ к ее исходно гладкой поверхности.

15 4. Теплообменная поверхность по п. 1, отличающаяся тем, что угол конфузальности между боковыми стенками выемок в направлении от входной к выходной кромкам составляет $\alpha=30^\circ$.

20 5. Теплообменная поверхность по п. 1, отличающаяся тем, что боковые стенки выемок и соединяющая их донная часть выполнены вогнутыми с радиусом кривизны $R \approx (4 \dots 6)R_{\text{вх}}$.

25

30

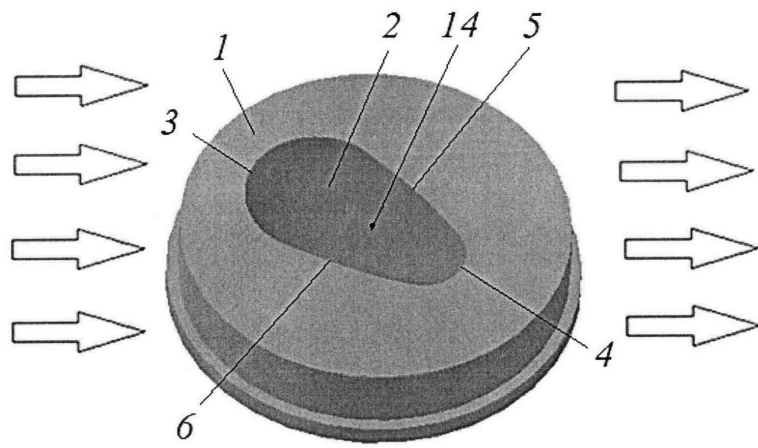
35

40

45

1

Теплообменная поверхность
1/3

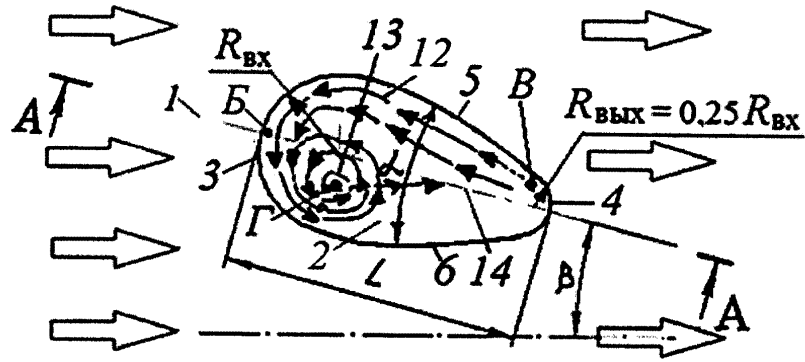


Фиг. 1

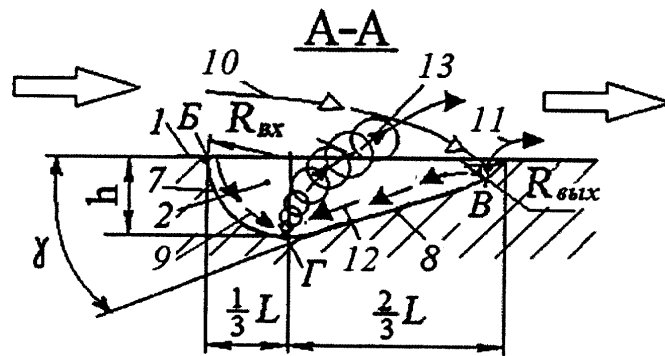
2

Теплообменная поверхность

2/3



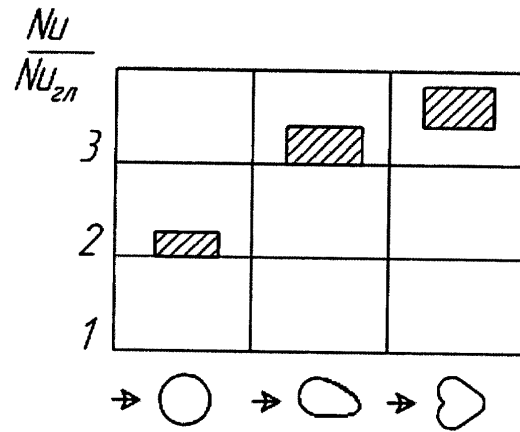
Фиг. 2



Фиг. 3

Теплообменная поверхность

3/3



Фиг. 4