
УДК 621.45.02:536.24

А.А. Кащенко

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков

ГИДРОДИНАМИКА НА ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕШЕТКИ ПРОФИЛЕЙ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментального исследования гидродинамики на торцевых поверхностях решетки профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых менялась путём уменьшения высоты профилей h и увеличения толщины накопленного пограничного слоя $\delta_{вх}$ на входе в объект исследования. Получены данные уточняющие физическую картину течения и характеризующие распределение скорости на внешней границе пограничного слоя торцевой поверхности в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

Ключевые слова: гидродинамика на торцевых поверхностях, решетка профилей соплового аппарата турбины, вторичные течения, поле скоростей на внешней границе пограничного слоя.

Вступление

Постановка проблемы. Повышение температуры газа перед турбиной T_T^* является одной из ос-

новных задач при создании современных авиационных ГТД. За счет этого достигается значительное улучшение их удельных параметров. С ростом T_T^* отношение h/t (h – высота, t – шаг решетки турбин-

ных лопаток) имеет тенденцию к уменьшению. В высокотемпературных газовых турбинах ($T_g^* = 1650...1750 \text{ K}$) значения h и t становятся соизмеримыми между собой. При этом в межлопаточных каналах сопловых аппаратов возникает сложная трехмерная вихревая структура течения, которая занимает практически всю проточную часть канала. Кроме того, уменьшение h/t ведет к росту относительной толщины пограничного слоя на входе в сопловой аппарат, что еще более интенсифицирует вторичные течения и вихревые структуры порождаемые ими. Наличие в межлопаточных каналах соплового аппарата трехмерного пограничного слоя и вихревых структур создает значительные трудности при расчете процессов течения и теплообмена, - прежде всего из-за тесной взаимосвязи течения на торцевой поверхности и лопатках. Рост T_g^* по-новому ставит вопрос о достоверности методик расчёта граничных условий теплообмена, которые должны учитывать структуру и интенсивность вторичных течений. По сравнению с количеством имеющихся в литературе газодинамических исследований, объём информации о влиянии вторичных течений на теплообмен в турбинных решетках значительно меньше. Из имеющихся данных не ясно как меняется теплоотдача торцевых поверхностей при изменении интенсивности вторичных течений, например, при уменьшении h и увеличении толщины $\delta_{вх}$ накопленного пограничного слоя на входе в турбинную решетку, какова степень раздельного влияния канального и П-образного вихрей на газодинамику и теплоотдачу торцевых стенок. Интерес к торцевой поверхности обусловлен теми трудностями, которые она представляет при организации её тепловой защиты в сопловых аппаратах с малыми значениями h/t . При этом возникают серьезные затруднения в расчете локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых поверхностях соплового аппарата при проектировании оптимальной системы её воздушного охлаждения.

Анализ последних достижений и публикаций.

В работе [1] приведен обзор данных по физической структуре течения в криволинейных каналах и сопловых аппаратах с отношением h/t , близким к единице. Отдельные аспекты теплообмена торцевой поверхности рассмотрены в работах [2 - 4]. Однако, в этих работах нет данных учитывающих степень влияния относительной высоты профилей h/t и толщины $\delta_{вх}$ накопленного пограничного слоя на входе в турбинную решетку, а также раздельного влияния канального и П-образного вихрей на газодинамику и теплоотдачу торцевых стенок, что делает результаты этих работ малопригодными для разработки методики расчета их локального теплообмена.

Формулировка цели статьи. В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования поля скоростей на внешней границе

пограничного слоя торцевых поверхностей решётки профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых меняется путём уменьшения высоты профилей h и увеличения толщины накопленного пограничного слоя $\delta_{вх}$ на входе в объект исследования.

Изложение основного материала

Измерения поля скоростей внешнего течения, проведенные на торцевых стенках плоского канала профилей соплового аппарата турбины [5], позволили определить степень влияния канального и углового вихрей на гидродинамику потока. При этом интенсивность вторичных течений в проточной части канала менялась путём уменьшения параметра h/t (h – высота профильной части канала, t – шаг установки профилей) и увеличения толщины $\delta_{вх}$ накопленного пограничного слоя на входе в канал.

Для выявления влияния П – образного вихря на гидродинамику потока, уточнения физической картины течения и определения численных значений параметров входящих в критерии подобия изучаемого процесса, были проведены измерения поля скоростей внешнего течения на торцевых стенках крупномасштабной (М 2:1) плоской модели решётки профилей соплового аппарата турбины. Решетка состояла из четырех профилей образующих три межпрофильных канала. Все измерения выполнены в среднем канале. Опыты проведены в решётке профилей идентичных профилям исследованного канала при одних и тех же значениях параметра h/t . Интенсивность вторичных течений менялась за счет изменения высоты проточной части решётки h и толщины пограничного слоя на входе $\delta_{вх}$. Поле статического давления измерялось методом отбора со стенки. Для этого, верхняя торцевая стенка решётки препарировалась 60 приемниками статического давления, изготовленными из наконечников медицинских игл. Измерения в ядре потока выполнены в среднем по высоте сечения межпрофильного канала с помощью трехточечного насадка размещенного в специальном координатнике. В ядре измерялись угол поворота α_f и полное давление потока p_x^* . Схема рабочей части аэродинамической трубы и решетки профилей, а также основные геометрические данные профиля и решетки профилей приведены в [5]. Исследования проведены при следующих значениях: $\delta_{вх} - 2 \text{ мм}; 10 \text{ мм}; h/t - 1,0; 0,47; 0,24; 0,14; Re_1 - 1,8 \cdot 10^5; 2,2 \cdot 10^5; 3,3 \cdot 10^5$.

При течении газа через решетку профилей соплового аппарата турбины возникает более сложная, чем в канале, структура вторичных течений. Она отличается наличием П – образного (подковообразного) вихря, который образуется в результате взаимодействия накопленного пограничного слоя на входе в решетку с входными кромками профилей. В седловой точке профиля поток отрывается и свора-

чивается в вихревой жгут направление вращения, которого определяется профилем скорости в пограничном слое. Образовавшийся П – образный вихрь двумя ветвями входит в межпрофильный канал. На рис. 1 представлены обобщённые результаты визуализации течения на торцевой поверхности решетки профилей в области вогнутой стенки, полученные методом масляной пленки. На рис. 1 видно, что ветвь П – образного вихря примыкающая к входной кромке профиля на стороне давления имеет вращение совпадающее с вращением канального вихря и сливается с ним образуя единый вихрь.

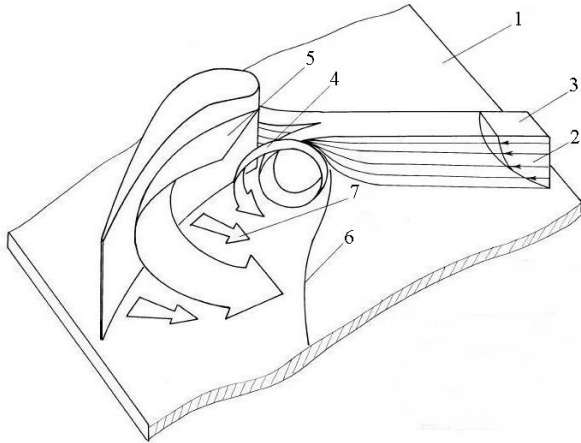


Рис. 1. Вихревая структура на торцевой поверхности в области вогнутой стенки лопатки соплового аппарата турбины: 1 – торцевая поверхность; 2 – пограничный слой на входе в решётку; 3 – поверхность тока; 4 – ветвь П – образного вихря; 5 – канальный вихрь; 6 – линия трёхмерного отрыва потока; 7 – поперечное течение на торцевой поверхности

На рис. 2 представлены обобщённые результаты визуализации течения на торцевой поверхности решетки профилей в области выпуклой стенки.

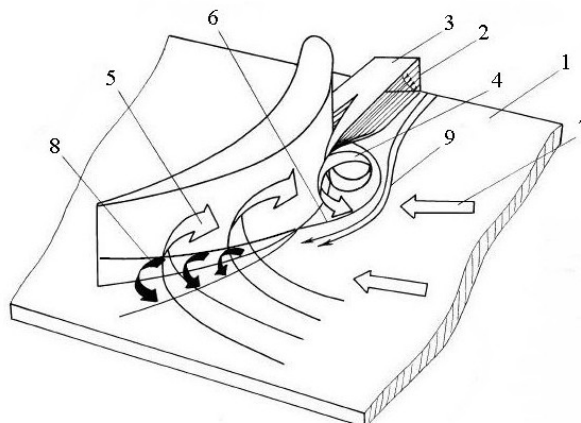


Рис. 2. Вихревая структура на торцевой поверхности в области выпуклой стенки лопатки соплового аппарата турбины: 8 – угловой вихрь; 9 – предельные линии тока

На рис. 2 видно, что ветвь П – образного вихря на стороне разрежения имеет вращение противоположное

вращению канального вихря и «выдавливается» им на выпуклую стенку профиля. Далее она распространяется сбоку от канального вихря и не смешивается с ним. Положение предельной линии тока на выпуклой стенке профиля, появившейся в результате гидродинамического взаимодействия ветви П – образного вихря и канального вихря, зависит от интенсивности канального вихря, которая в свою очередь определяется геометрией решетки и параметрами потока.

На рис. 3 приведена зависимость $\bar{c}_x = f(\bar{x})$, полученная для трёх характерных областей канала и решётки профилей, - средней линии, выпуклой и вогнутой поверхностей профиля, - при $h/t = 1,0$ и слитом пограничном слое на входе. Здесь: $\bar{c}_x = c_x / c_1$; $\bar{x} = x / b_0$; x – криволинейная координата, отсчитываемая от начала формирования теплового пограничного слоя; b_0 – хорда профиля; индекс x означает значения параметров на оси x ; c_x , c_1 – скорость на внешней границе пограничного слоя и на входе в объект исследования, соответственно.

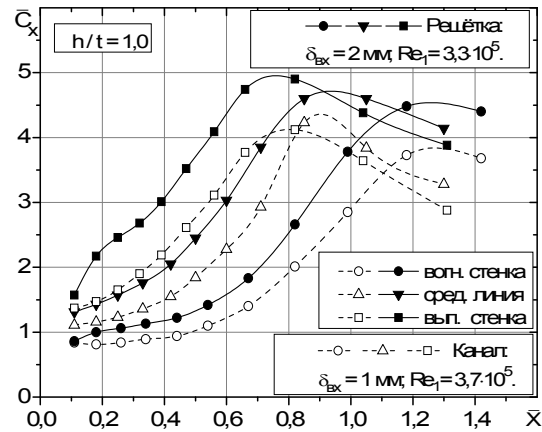


Рис. 3. Зависимость $\bar{c}_x = f(\bar{x})$

Анализ зависимости $\bar{c}_x = f(\bar{x})$ показывает, что относительная скорость потока \bar{c}_x в решетке профилей возрастает во всей области течения по сравнению с криволинейным каналом. Подковообразный вихрь оказывает сильное локальное влияние на гидродинамические параметры потока в области входных кромок профилей (до $\bar{x} \approx 0,1..0,3$). Так, в области вогнутой стенки профиля величина диффузорной зоны, по сравнению с криволинейным каналом, значительно сокращается. Уже при $\bar{x} > 0,18$ локальная скорость потока становится больше скорости на входе. В области выпуклой стенки наблюдается значительное (до 49%) увеличение \bar{c}_x при $\bar{x} \leq 0,4$. Кроме того, скорость вращения частиц у центра канального вихря в значительной мере зависит от напряженности ветви П – образного вихря на стороне давления. Так, в области вогнутой стенки и средней линии межпрофильного канала решётки максимальное увеличение \bar{c}_x , по сравнению с каналом, наблюдается в области горла и достигает 32% и 41%, соответственно. В об-

ласти выпуклой стенки отличия \bar{c}_x достигают 26%. В остальном характер изменения \bar{c}_x в решётке соответствует каналу. Также наблюдается существенная неравномерность изменения \bar{c}_x по ширине межпрофильного канала. Максимальные значения \bar{c}_x наблюдаются в области выпуклой, а минимальные в области вогнутой стенок профиля. Отличия минимальной скорости от максимальной достигают 270% в области горла. В межпрофильном канале решётки так же имеются две диффузорные зоны. Увеличение толщины накопленного пограничного слоя на входе в решётку при $h/t = 1,0$ не меняет характера изменения $\bar{c}_x = f(\bar{x})$, но при этом скорость потока возрастает во всех характерных областях проточной части межпрофильного канала решётки.

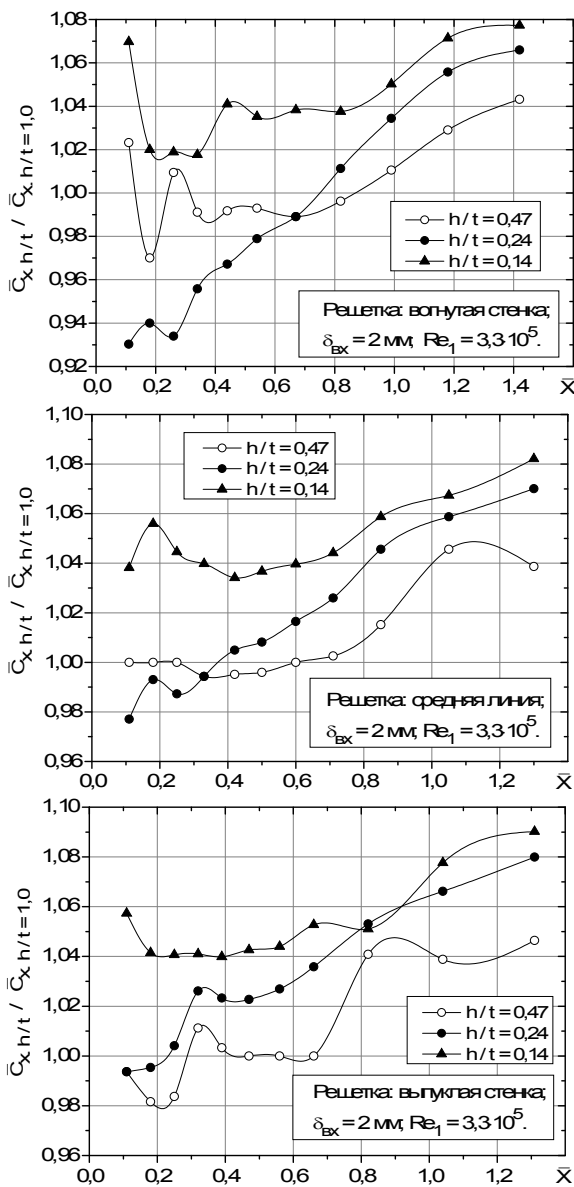


Рис. 4. Скорость на внешней границе пограничного слоя при различных значениях h/t и слитом пограничном слое на входе ($\delta_{вх} = 2 \text{ мм}$)

Интенсивность вторичных течений и степень взаимодействия вихрей в значительной мере зависят

от величины соотношения h/t и толщины пограничного слоя на входе. Изменения отношения скорости потока при различных значениях h/t к скорости при $h/t = 1,0$ в характерных областях проточной части межпрофильного канала решётки при $\delta_{вх} = 2 \text{ мм}$ показаны на рис. 4. При тонком пограничном слое на входе уменьшение h/t от 1,0 до 0,24 приводит к перераспределению скорости потока на внешней границе пограничного слоя. Так, при уменьшении h/t от 1,0 до 0,24 скорость потока в области вогнутой стенки и средней линии уменьшается, а в области выпуклой увеличивается. Дальнейшее уменьшение h/t до 0,14 приводит к увеличению скорости потока во всей области течения в среднем на (4...5)%.

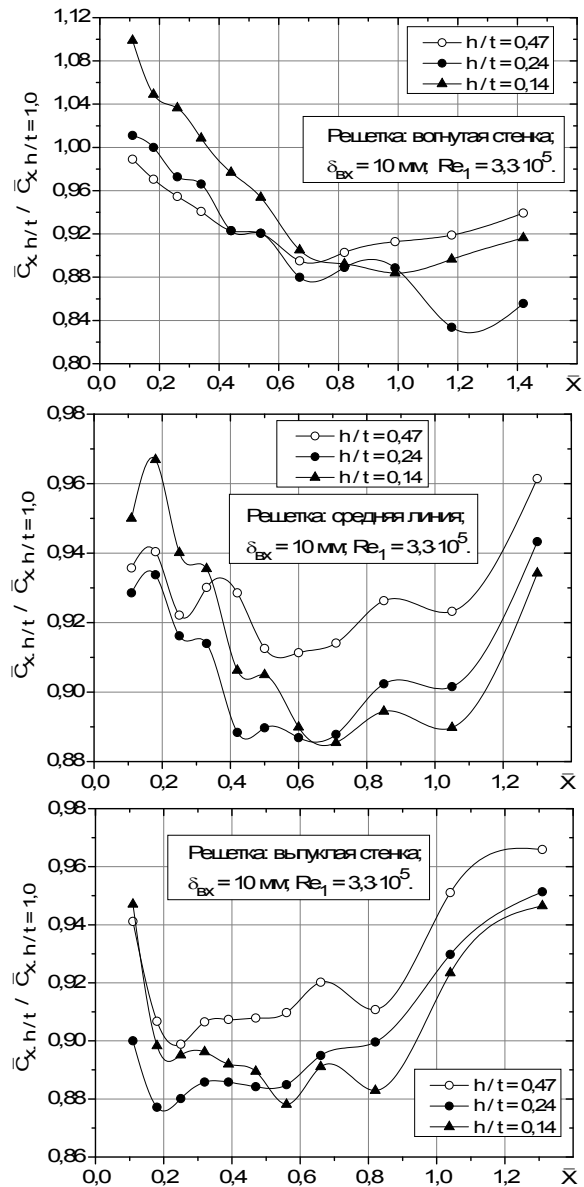


Рис. 5. Скорость на внешней границе пограничного слоя при различных значениях h/t и накопленном пограничном слое на входе ($\delta_{вх} = 10 \text{ мм}$)

Интенсивность, как вторичных течений, так и их взаимодействия при накопленном пограничном слое на входе в решётку растёт, т.к. увеличивается доля жидкости с низким импульсом движения. Из-

менения отношения скорости потока при различных значениях h/t к скорости при $h/t = 1,0$ в характерных областях проточной части межпрофильного канала решётки при накопленном пограничном слое на входе $\delta_{\text{вх}} = 10$ мм приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что уменьшение h/t от 1,0 до 0,14 ведет к более значительному изменению поля скоростей на внешней границе пограничного слоя. Так, в области вогнутой стенки изменение h/t то 1,0 до 0,24 ведет к снижению скорости. Максимальные отличия достигают 10% в области горла. Дальнейшее уменьшение h/t до 0,14 приводит к значительному (до 10%) росту скорости до $\bar{x} = 0,3$. Затем происходит ее снижение, которое в области горла достигает 12%. В области выпуклой стенки и средней линии при уменьшении h/t от 1,0 до 0,14 происходит снижение скорости потока в среднем на (9...11)%.

При изменении режима течения на входе Re_1 от $1,8 \cdot 10^5$ до $3,3 \cdot 10^5$ скорости на внешней границе пограничного слоя практически не меняются.

Выводы

Экспериментальные исследования по изучению гидродинамики на торцевых поверхностях решётки профилей соплового аппарата турбины при увеличении толщины пограничного слоя на входе и уменьшении высоты её профильной части, позволяют сделать следующие выводы:

- опыты, проведенные в решётке профилей, позволяют дополнить структуру вторичных течений в проточной части межпрофильного канала путём создания условий для образования П – образного вихря, и определить как локальное, так и общее влияние этого вихря на гидродинамику потока;

- распределение скорости внешнего потока на торцевой поверхности решётки профилей при $h/t = 1,0$ и $\delta_{\text{вх}} = 2$ мм, характеризуется существенной неравномерностью, как по ширине, так и по длине проточной части межпрофильного канала;

- ветвь П – образного вихря на стороне давления профиля значительно усиливает интенсивность канального вихря; относительная скорость потока на внешней границе пограничного слоя на торцевой поверхности в решетке профилей возрастает во всей области течения по сравнению с криволинейным каналом;

- П – образный вихрь оказывает сильное локальное влияние на гидродинамику потока в области входных кромок профилей;

- анализ поля скоростей внешнего течения показывает, что уменьшение h/t и увеличение толщины накопленного пограничного слоя на входе в решётку существенно меняет как интенсивность вторичных течений, так и характер взаимодействия вихревых структур;

- характер изменения поля скоростей на торцевых поверхностях решётки, определяется вихревой структурой потока и интенсивностью вторичных течений;

- при тонком пограничном слое на входе в решётку скорости внешнего течения возрастают во всех характерных областях проточной части межпрофильного канала при уменьшении h/t от 1,0 до 0,14;

- при увеличении толщины накопленного пограничного слоя на входе в решётку скорости внешнего течения при уменьшении h/t уменьшаются по сравнению с тонким пограничным слоем во всей области течения;

- данные о поле скоростей внешнего течения необходимы для выявления влияния вихревой структуры и интенсивности вторичных течений на гидродинамику потока, уточнения физической картины течения и определения численных значений параметров входящих в критерии подобия изучаемого процесса.

Список литературы

1. Сивердинг С.Н. *Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений в каналах турбинных решеток* / С.Н. Сивердинг // *Энергет. машины и установки*. - 1985. - № 2. - С. 1 – 5.
2. *Экспериментальное исследование теплообмена на торцевых поверхностях и лопатках в крупномасштабной турбинной решетке* / Р.А. Грациани, М.Ф. Блэр, Ж.Р. Тэйлор, Р.Е. Мэйл // *Энергет. машины и установки*. - 1980. - № 2. - С. 29 – 33.
3. Бэйли Д.А. *Исследование полей осредненной и турбулентной скорости в крупномасштабном канале турбинных лопаток* / Д.А. Бэйли // *Энергет. машины и установки*. - № 1. - С. 87 – 92.
4. *Исследование локального теплообмена на торцевой поверхности модели соплового аппарата* / А.А. Халатов, К.И. Капитанчук, А.С. Коваленко, А.Н. Труфанов // *Изв. вузов. Авиац. техника*. - 1986. - № 2. - С. 68 – 74.
5. Каценко, А.А. *Поле скоростей внешнего течения на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при интенсивных вторичных течениях [Текст]* / А.А. Каценко // *Система обробки інформації: збір. наук. пр. Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. І. Кожедуба*. - X, 2013. - Вып. 5 (112). - С. 38 – 42.

Поступила в редколлегию 3.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ГІДРОДИНАМІКА НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ ҐРАТ ПРОФІЛІВ СОПЛОВОГО АПАРАТА ТУРБИНИ ПРИ ІНТЕНСИВНИХ ВТОРИННИХ ПЛИНАХ

О.О. Кашенко

Наведено результати експериментального дослідження гідродинаміки на торцевих поверхнях ґрат профілів соплового апарата турбіни при вторинних плинах, інтенсивність яких мінялася шляхом зменшення висоти профілів h і

збільшення товщини накопиченого прикордонного шару $\delta_{вх}$ на вході в об'єкт дослідження. Отримані дані уточнюючі фізичну картину плинну і характеризуючи розподіл швидкості на зовнішній границі прикордонного шару торцевої поверхні в широкому діапазоні зміни визначальних параметрів.

Ключові слова: гідродинаміка на торцевих поверхнях, грати профілів соплового апарата турбіни, вторинні плинні, поле швидкостей на зовнішній границі прикордонного шару.

HYDRODYNAMICS ON THE EDGE SURFACES OF THE LATTICE PROFILES TURBINE NOZZLES IN INTENSIVE SECONDARY FLOWS

A. A. Kaschenko

Results of the experimental research of hydrodynamics on the edge surfaces of the lattice profiles turbine nozzles at secondary currents which intensity was changed by reduction of structures height (h) and increase of thickness of the saved up boundary layer ($\delta_{вх}$) at the input to the object of research. Obtained data which specifies the physics of currents and describes the speed distribution on the outer edge of the boundary layer of the edge surface in a wide range variations of defining parameters.

Keywords: hydrodynamics on edge surfaces, lattice profiles turbine nozzles, secondary currents, the speeds field on the outer edge of the boundary layer.