

УДК 621.45.02:536.24

А.А. Кашенко

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков

## ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ТЕЧЕНИЯ НА ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КАНАЛА ПРОФИЛЕЙ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментального исследования гидродинамики на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, интенсивность которых менялась путём уменьшения высоты профилей  $h$  и увеличения толщины накопленного пограничного слоя  $\delta_{\text{вх}}$  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, канал профилей соплового аппарата турбины, вторичные течения, поле скоростей на внешней границе пограничного слоя.

### Введение

**Постановка проблемы.** Повышение температуры газа перед турбиной  $T_r^*$  является одной из основных задач при создании современных авиационных ГТД. За счет этого достигается значительное улучшение их удельных параметров. С ростом  $T_r^*$  отношение  $h/t$  ( $h$  – высота,  $t$  – шаг решетки турбинных лопаток) имеет тенденцию к уменьшению. В высокотемпературных газовых турбинах ( $T_r^* = 1650 \dots 1750$  К) 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 сопловый 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  $T_r^*$  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 толщ-

ны  $\delta_{\text{вх}}$  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  $\delta_{\text{вх}}$  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 малоприменимыми для разработки методики расчета их локального теплообмена.

**Формулировка цели статьи.** В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования поля скоростей на внешней границе пограничного слоя на торцевых поверхностях канала профилей соплового аппарата турбины при вторичных течениях, в структуре которых отсутствует П-образный вихрь, и интенсивность которых меняется путём уменьшения высоты профилей  $h$  и увеличения толщины накопленного пограничного слоя  $\delta_{\text{вх}}$  на входе в объект исследования.

### Изложение основного материала

Измерения поля скоростей на внешней границе пограничного слоя торцевых поверхностей канала профилей, выполнялись с целью уточнения физической картины течения и определения численных значений величин входящих в критерии подобия изучаемого процесса. Конечной целью экспериментальных исследований было получение методики расчета граничных условий теплоотдачи торцевых поверхностей, учитывающей влияние вторичных течений.

Опыты выполнены в дозвуковой аэродинамической трубе разомкнутого типа [5]. Рабочая часть трубы позволяет размещать крупномасштабные плоские модели решеток профилей турбомашин. Она имеет устройства: слива накопленного пограничного слоя на входе в объект исследования параллельно его фронту; изменения высоты  $h$  подводящего и межпрофильных каналов; выравнивания скоса потока на входе в объект исследования. Объект исследования представляет собой крупномасштабную (М 2:1) плоскую модель межпрофильного канала соплового аппарата I ступени турбины, одного из современных авиационных ГТД. Канал сформирован из среднего канала решетки идентичных профилей соплового аппарата, с помощью ограничивающих стенок выполненных в виде сопла Витошинского. Схема рабочей части аэродинамической трубы и решетки профилей представлена на рис. 1.

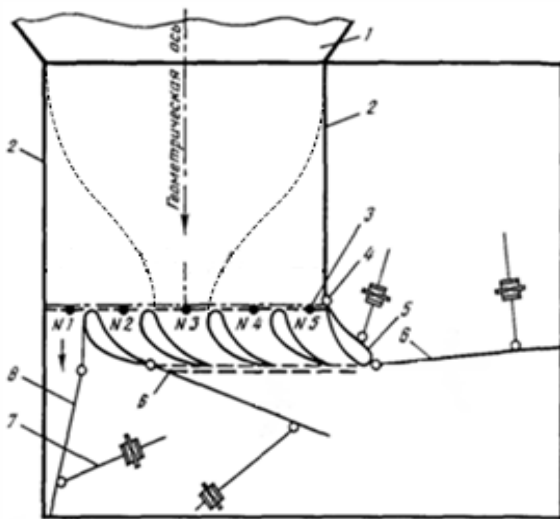


Рис. 1. Схема рабочей части аэродинамической трубы и решетки профилей: 1 – сопло Витошинского, 2 – ограничивающая стенка, 3 – места установки приемников полного давления, 4 – шарнирные соединения, 5 – подвижная стенка, 6 – поворотные пластины, 7 – винтовые пары, 8 – поворотная пластина канала № 1

Основные геометрические данные профиля и решетки профилей сведены в табл. 1. Всего исследовано 4 канала, которые отличались друг от друга

только соотношением  $h/t$  ( $h$  – высота профильной части,  $t$  – шаг установки профилей). Интенсивность вторичных течений менялась за счет уменьшения  $h$  и увеличения толщины  $\delta_{вх}$  пограничного слоя на входе. Исследования проведены пневмометрическим методом в широком диапазоне изменения определяющих параметров:  $\delta_{вх} - (1...5)$  мм;  $h/t - (1,0...0,14)$ ;  $Re_1 - (3,7...5,0) \cdot 10^5$ .

Таблица 1

Основные геометрические данные профиля и решетки профилей

Хорда профиля, мм	$b_0$	142
Высота профиля, мм	$h$	110
Шаг профилей в решетке, мм	$t$	110
Угол входа потока, град.	$\beta_1$	90
Ширина решетки профилей, мм	$B$	90
Размер горла решетки профилей, мм	$a_r$	32

Поле статического давления измерялось методом отбора со стенки. Для этого, верхняя торцевая стенка канала препарировалась 60 приемниками статического давления, изготовленными из накопечников медицинских игл. Измерения в ядре потока выполнены в среднем по высоте сечения канала с помощью трехточечного насадка размещенного в специальном координатнике. В ядре измерялись угол поворота  $\alpha_f$  и полное давление потока  $p_x^*$ .

На рис. 2 приведена зависимость  $\bar{c}_x = f(\bar{x})$ , полученная для трёх характерных областей канала, – средней линии, выпуклой и вогнутой поверхностей профиля, – при  $h/t = 1,0$  и слитом пограничном слое на входе ( $\delta_{вх} = 1$  мм). 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.

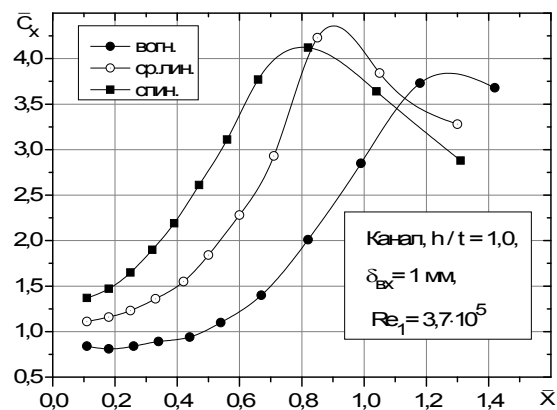


Рис. 2. Зависимость  $\bar{c}_x = f(\bar{x})$ .

Анализ зависимости  $\bar{c}_x = f(\bar{x})$  показывает, что распределение скорости потока вне пограничного слоя характеризуется существенной неравномерностью по ширине торцевой поверхности. Наибольшие значения скорости наблюдаются в области выпуклой, а наименьшие в области вогнутой стенок канала. Максимальные отличия достигают 270% в диапазоне  $\bar{x}$  от 0,55 до 0,75. Кроме того, в канале существует две диффузорные зоны.

Одна из них находится на входе в канал в области вогнутой стенки. Здесь до  $\bar{x} \approx 0,2$  происходит торможение потока. Затем скорость начинает возрастать, оставаясь до  $\bar{x} \approx 0,47$  ниже скорости  $c_1$ . Эта зона повышенного давления является причиной искривления линий тока ещё до входа в канал. Кривизна линий тока приводит к появлению центробежной силы  $F_{цб}$  и поперечного градиента давления  $\partial p / \partial z$ . На внешней границе пограничного слоя достигается равенство сил – центробежной и поперечного давления. На торцевых стенках, из-за трения, скорость и соответственно центробежная сила равны нулю, а величина поперечного градиента давления по толщине пограничного слоя не меняется. Поэтому на частицы жидкости внутри пограничного слоя действует избыточная сила, вызывающая их поперечное течение. В результате этого профиль скорости в пограничном слое приобретает вид, показанный на рис. 3.

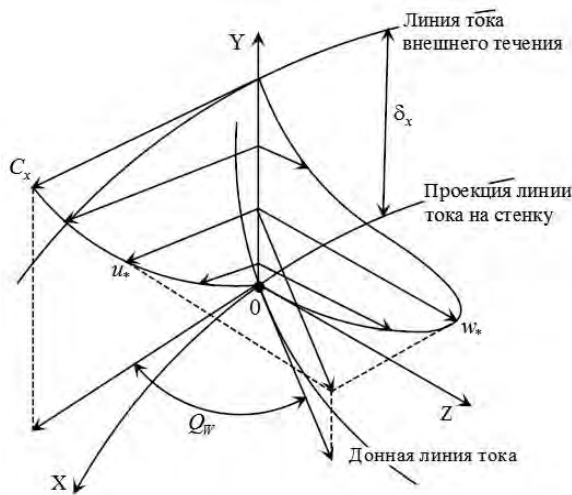


Рис. 3. Профиль скорости трёхмерного пограничного слоя.

Под действием поперечного градиента давления пристеночные частицы отклоняются от направления внешнего течения на конечный угол  $\theta_w$ , но не мгновенно, а постепенно в процессе своего движения. За время в течении, которого пристеночная частица сдвинется в направлении линии тока внешнего потока на величину  $dx$ , она приобретёт тем большую скорость в поперечном направлении, чем больше величина  $\partial p / \partial z$  и время пребывания на от-

резке  $dx$ . Время прохождения отрезка  $dx$  будет тем меньше, чем больше продольный отрицательный градиент давления  $\partial p / \partial x$ . Таким образом, величина поперечной скорости потока  $\omega$  и угла  $\theta_w$  зависит от соотношения локальных продольного и поперечного градиентов давления.

За горлом расположена вторая диффузорная зона. Здесь интенсивное торможение потока в области выпуклой стенки приводит к тому, что вся масса стекающей по торцу «подторможенной» жидкости скапливается в зоне горла. Это хорошо видно на рис. 4, где представлены линии тока, полученные методом масляных точек. Под действием сносящего продольного градиента давления, а также компенсационного движения в ядре потока, поднимаясь с торцевой стенки жидкость участвует в вихревом течении, – канальном вихре.



Рис. 4. Линии тока в плоском канале профилей.

Уменьшение высоты канала ведёт к изменению интенсивности вторичных течений. При этом существенно меняются газодинамические параметры потока на торцевых поверхностях. Отношения скорости на внешней границе пограничного слоя при различных значениях  $h/t$  к соответствующей скорости при  $h/t = 1,0$  и слитом пограничном слое  $\delta_{вк} = 1\text{мм}$  показано на рис. 5.

При пограничном слое  $\delta_{вх} = 1$  мм уменьшение  $h/t$  от 1,0 до 0,47 ведёт к увеличению скорости внешнего потока вдоль всех характерных линий канала в среднем на 7%. При дальнейшем уменьшении  $h/t$  наблюдается «выравнивание» поля скоростей относительно соответствующего поля при  $h/t = 1,0$ . Так при  $h/t = 0,24$  отличия составляют в среднем 4%. При  $h/t = 0,14$  они практически исчезают в области вогнутой стенки. В области средней и выпуклой стенки их нет до горла канала, но в области горла и в косом срезе наблюдается уменьшение скорости внешнего потока.

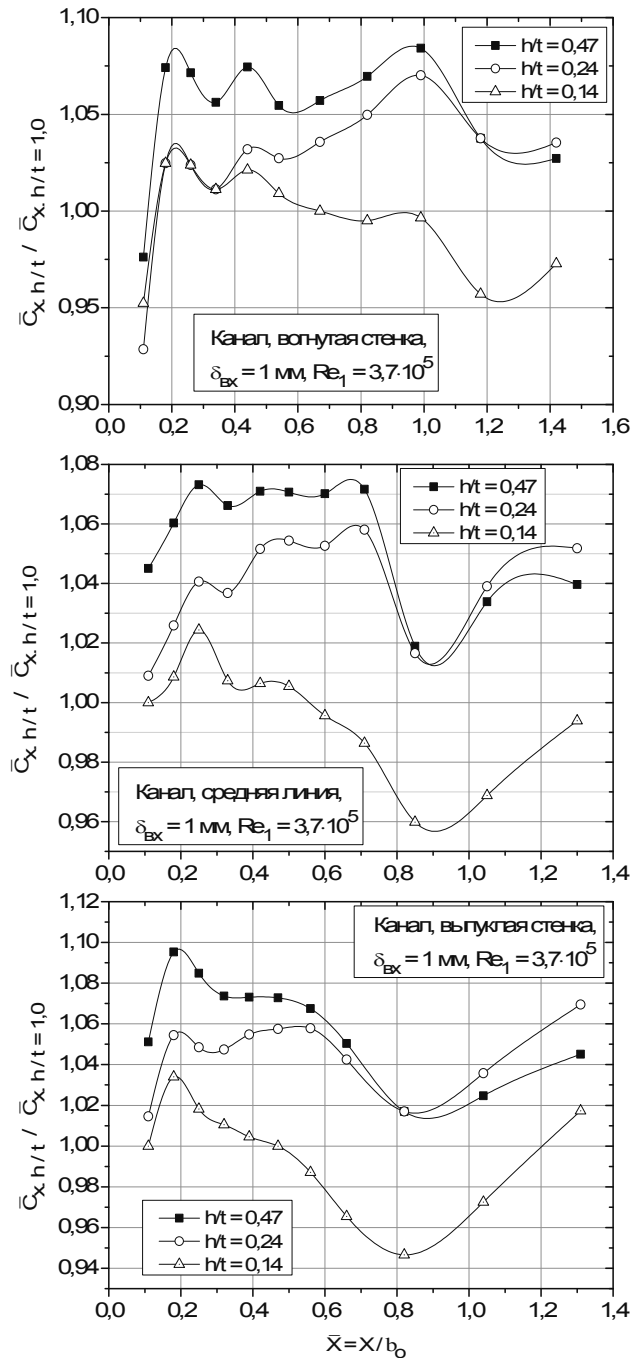


Рис. 5. Скорость на внешней границе пограничного слоя при различных значениях  $h/t$  и слитом пограничном слое на входе ( $\delta_{вх} = 1$  мм).

Развитие вторичных течений и степень их взаимодействия при уменьшении  $h/t$  зависят от толщины накопленного пограничного слоя на входе в канал. Отношения скорости на внешней границе пограничного слоя при различных значениях  $h/t$  к соответствующей скорости при  $h/t = 1,0$  и накопленном пограничном слое  $\delta_{вх} = 5$  мм показано на рис. 6.

При пограничном слое  $\delta_{вх} = 5$  мм уменьшение  $h/t$  от 1,0 до 0,14 приводит к увеличению скорости внешнего потока. При  $h/t = 0,47$  отличия составляют 4%, а при изменении  $h/t$  от 0,47 до 0,14 они достигают 10%.

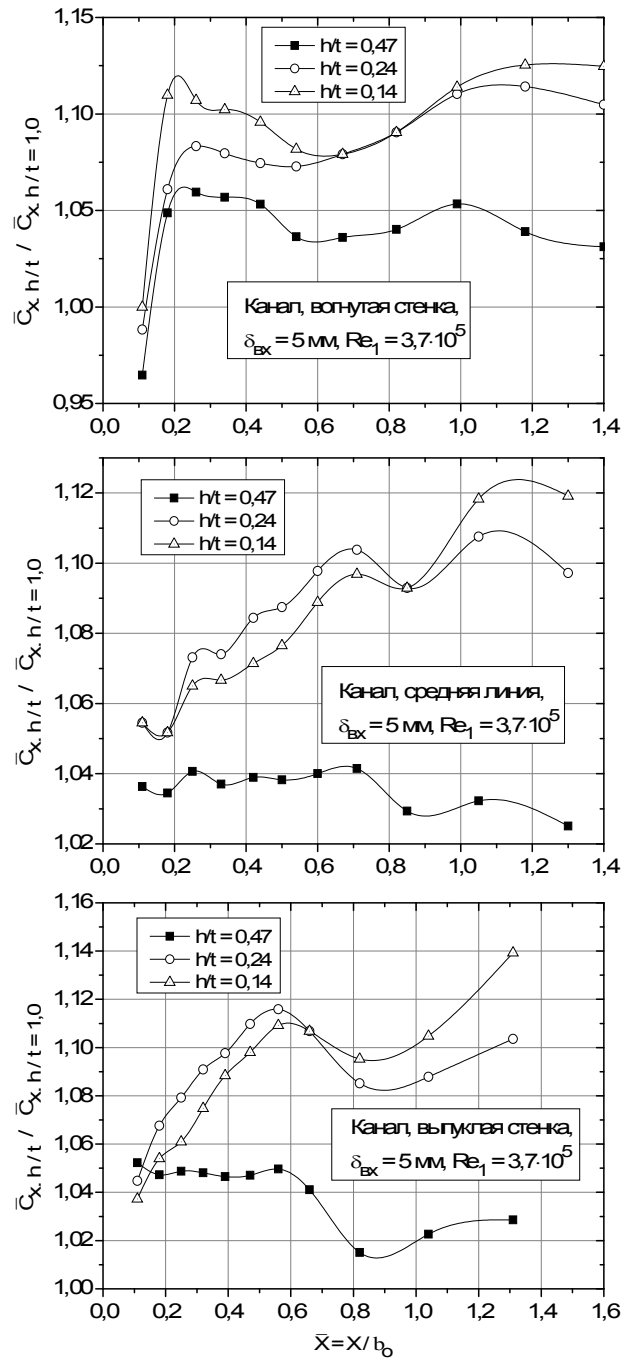


Рис. 6. Скорость на внешней границе пограничного слоя при различных значениях  $h/t$  и накопленном пограничном слое на входе ( $\delta_{вх} = 5$  мм).

Очевидно, интенсивность, как вторичных течений, так и их взаимодействия при накопленном пограничном слое на входе в канал растёт, поскольку увеличивается доля жидкости с низким импульсом движения.

При изменении режима течения на входе  $Re_1$  от  $3,7 \cdot 10^5$  до  $5,0 \cdot 10^5$  скорости на внешней границе пограничного слоя практически не меняются.

## Выводы

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

– экспериментальные исследования гидродинамики, проведенные в канале профилей соплового аппарата турбины, позволяют упростить структуру вторичных течений в проточной части канала путём исключения условий для образования П-образного вихря, и определить локальное влияние канального вихря на гидродинамику потока;

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

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

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

– из сравнения графиков представленных на рис. 5 и 6 видно, что скорости внешнего течения при тонком пограничном слое на входе возрастают, во всех характерных областях проточной части канала, при уменьшении  $h/t$  от 1,0 до 0,24, а затем уменьшаются при уменьшении  $h/t$  до 0,14;

– при увеличении толщины накопленного пограничного слоя на входе в канал характер изменения скорости внешнего течения при уменьшении  $h/t$  сохраняется таким же, как и при тонком пограничном слое, но абсолютные значения поля скоростей возрастают во всей области течения.

## 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. 1-7.
2. Экспериментальное исследование теплообмена на торцевых поверхностях и лопатках в крупномасштабной турбинной решетке / Р.А. Грациани, М.Ф. Блэр, Ж.П. Тэйлор, Р.Е. Мэйл // Энергет. машины и установки. – 1980. – № 2. – С. 29-34.
3. Бэйли Д.А. Исследование полей осредненной и турбулентной скорости в крупномасштабном канале турбинных лопаток // Энергет. машины и установки. – 1980. – № 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. Авиаци. техника. – 1986. – № 2. – С. 68-73.
5. Сысков Л.В. Экспериментальная установка для исследования газодинамики и теплообмена в плоских решетках профилей / Л.В. Сысков, А.А. Кащенко, В.В. Клеваний // Летательные аппараты и авиационные двигатели. – К.: КВВАИУ, 1988. – Вып. 4. – С. 83-85.

Поступила в редакцию 1.06.2013

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

## ПОЛЕ ШВИДКОСТЕЙ ЗОВНІШНЬОГО ПЛІНУ НА ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХНЯХ КАНАЛУ ПРОФІЛІВ СОПЛОВОГО АПАРАТА ТУРБИНИ ПРИ ІНТЕНСИВНИХ ВТОРИННИХ ПЛІНАХ

О.О. Кащенко

Наведено результати експериментального дослідження гідродинаміки на торцевих поверхнях каналу профілів соплового апарата турбіни при вторинних плинах, інтенсивність яких мінлася шляхом зменшення висоти профілів  $h$  і збільшення товщини накопленого прикордонного шару  $\delta_{вх}$  на вході в об'єкт дослідження. Отримані дані уточнюючі фізичну картину плин і характеризуючі розподіл швидкості на зовнішній границі прикордонного шару торцевої поверхні в широкому діапазоні зміни визначальних параметрів.

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

## THE SPEEDS FIELD OF THE EXTERNAL FLOW ON THE EDGE SURFACES THE CHANNEL OF STRUCTURES OF TURBINE NOZZLE AT INTENSIVE SECONDARY CURRENTS

A.A. Kaschenko

Results of the experimental research of hydrodynamics on the edge surfaces of the gas turbine structure nozzle channel 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, turbine structure nozzle channel, secondary currents, the area of speeds on the edge surfaces.