

DOI 10.15589/jnn20170206
 УДК 532.516
 Ш71

**FORMATION OF VERTEX FLOW IN THE ROTATING CHANNEL
 AND INFLUENCE OF GEOMETRIC FACTORS ON ITS INTENSITY**

**ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ
 ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ И ВЛИЯНИЕ НА ЕГО
 ИНТЕНСИВНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Andrii I. Shmanenko
 shmanenko@mail.ru
 ORCID: 0000-0001-6415-4381

А. И. Шманенко,
 соискатель

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The paper presents the analysis of the secondary flow intensity and pattern in a rotating channel, which simulates the cooling channel of the rotating blade of a gas turbine engine. The author chooses a circle and square cross-section channel as an object of the study. The paper studies the circle cross-section channel at different cross-section diameters, rotation radiuses, rotation rates and positions of the channel relative to the axis of rotation. Influence of the above mentioned factors on the intensity and structure of the secondary flow of air in the rotating channel has been evaluated. The computations were performed by solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (the RANS method) using a SST (Shear Stress Transport) turbulence model. The numerical grids were of the tetrahedron form. The air ideal gas was used as the working medium.

Keywords: secondary flow; vertex flow; rotating channel.

Аннотация. Выполнен анализ интенсивности и характера вторичных течений во вращающихся каналах, моделирующих охлаждающий канал рабочей лопатки газотурбинного двигателя. Анализ осуществлялся для каналов с круглой и квадратной формой поперечного сечения. Для канала круглого сечения произведены расчеты при различных диаметрах поперечного сечения, радиусах вращения, частотах вращения и положений канала относительно оси вращения. Изучено влияние вышеперечисленных факторов на интенсивность и структуру вторичных течений.

Ключевые слова: вторичные течения; вихревое течение; вращающийся канал.

Анотація. Виконано аналіз інтенсивності й характеру вторинних течій у каналі, що обертається, який моделює охолоджувальний канал робочої лопатки газотурбінного двигуна. Аналіз здійснювався для каналів круглого й квадратного перерізів. Для каналу круглого перерізу проведено розрахунки за різних діаметрів поперечного перерізу, радіусів обертання, частот обертання й положень каналу щодо осі обертання. Вивчено вплив вищезазначених чинників на інтенсивність і структуру вторинних течій.

Ключові слова: вторинні течії; вихрова течія; канал, що обертається.

REFERENCES

- [1] Khalatov A. A., Romanov V. V., Borisov I. I., Dashevskyy Yu. Ya., Severin S. D. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh tsentrobezhnykh massovykh sil* [Heat transfer and hydrodynamics in the fields of centrifugal mass forces]. *Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy* [Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine]. Kiev, 2010. 317 p.
- [2] Shmanenko A. I. *Obrazovaniye vikhryevogo tyecheniya vo vrashchayushchyemysya kanalye i vliyaniye na yego intyensivnost ryezhimnykh faktorov* [Formation of vertex flow in the rotating channel and influence of operation factors on its intensity]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*. Mykolaiv, NUK Publ., 2017, no. 1.
- [3] Elfert M., Schroll M., Förster W. PIV-Measurement of secondary flow in a rotating two-pass cooling system with an improved sequencer technique. ASME Turbo Expo, June 14–18, 2010, Glasgow, UK, Paper GT-2010-23510.
- [4] Huh M., Lei J., Han J.C. Influence of Channel Orientation on Heat Transfer in a Two-Pass Smooth and Ribbed Rectangular Channel (AR=2:1) under Large Rotation Numbers. ASME Turbo Expo, June 14-18, 2010, Glasgow, UK, Paper GT2010-22190.

- [5] Lei J., Han J.C., Huh M. Effect of rib spacing on heat transfer in two pass rectangular channel (AR=2:1) at high rotation number. ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada Paper GT2011-45926.
- [6] Schroll M., Lange L., Elfert M. Investigation of the effect of rotation on the flow in a two-pass cooling system with smooth and ribbed walls using PIV. ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, Paper GT2011-46427.
- [7] Wagner J. H., Johnson B. V., Kopper F. C. Heat Transfer in Rotating Serpentine Passages with Smooth Walls. ASME J. of Turbomachinery, 1991, Vol. 113, pp. 321–330.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Срок службы рабочих лопаток газовых турбин напрямую связан с температурой материала лопатки во время работы и, как следствие, от выбранной системы охлаждения. На сегодняшний день существует огромное количество различных методик, позволяющих интенсифицировать теплообмен между охлаждающим воздухом и стенками лопатки. Несмотря на это, исследования в области повышения эффективности теплообмена продолжают и представляют огромный интерес как в научном смысле, так и с точки зрения практического применения.

Перспективными являются системы охлаждения лопаток газовых турбин, в которых вихревые течения образуются не путем разрушения структуры потока и существенного повышения гидравлического сопротивления охлаждающего канала, а за счет воздействия сил Кориолиса, что определяет актуальность изучения подобных систем охлаждения.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

При течении воздуха во вращающемся канале охлаждаемой рабочей лопатки турбины в радиальном направлении под действием сил Кориолиса возникает движение воздуха, перпендикулярное к перемещению основного потока. Это приводит к формированию вихревых явлений в канале, которые мало изучены.

М. Хух [4] провел экспериментальное исследование влияния положения двухходового канала относительно оси вращения на теплопередачу. Опыт осуществлялся при повороте канала на 90 и 135° относительно оси вращения для гладкого канала и канала с оребрением. Частота вращения канала изменялась от 0 до 400 об/мин, число Рейнольдса — от 10000 до 40000. Интенсивность теплопередачи определялась путем замера температуры стенок канала с помощью 48-ми термопар, размещенных вдоль канала. Анализ результатов показал, что во вращающемся канале независимо от ориентации среднее значение теплопередачи на задней стенке в гладком канале увеличивается более чем на 50% при движении потока от оси вращения. При направлении потока к оси вращения среднее значение теплопередачи на задней стенке уменьшается на 30%. При использовании канала с оребрением вращение практически не влияет на интенсивность теплопередачи.

В работе [5] Дж. Лей провел исследование влияния расстояния между ребрами в двухходовом вращающемся канале на интенсивность теплопередачи. Эксперимент выполняли на той же установке, что и в [4], для различных отношений расстояния между ребрами к высоте ребра (5; 7,5; 10). Угол расположения ребер к потоку составлял 45°. В итоге было установлено, что в стационарном канале при уменьшении отношения расстояния между ребрами к высоте ребра интенсивность теплопередачи на передней и задней стенке возрастает, а с увеличением числа Рейнольдса — снижается на всех стенках. Вращение канала приводит к спаду интенсивности теплопередачи, а изменение отношения расстояния между ребрами к высоте ребра практически не влияет на неё во вращающемся канале.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — численное исследование вихревого течения во вращающемся канале и определение влияния геометрических факторов на структуру этого течения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Объектом исследования является охлаждающий канал рабочей лопатки газотурбинного двигателя. Геометрические параметры модели вращающегося канала представлены на рис. 1. Для расчетов выбран канал круглого сечения диаметром 6 мм, длина канала 80 мм. Для проведения соответствующих численных расчетов с помощью современных систем вычислительной гидродинамики (CFD) построена конечно-разностная сетка.

Вращение канала моделировалось путём движения домена вокруг оси. Частота вращения составляла 7400 оборотов в минуту, ось находилась на расстоянии 0,49 м от корневого сечения канала. На входе в канал задавалось полное давление $P = 1040000$ Па и температура $T = 733$ К. Граничные условия на входе в канал накладывались на нижнюю поверхность конуса. На выходе из канала предполагался расход охлаждающего воздуха $G = 0,02$ кг/с.

На стенке были определены следующие граничные условия: гладкая стенка, температура стенки 900 К. В качестве рабочей среды (рабочего тела) использовался идеальный газ — воздух. Модель турбулентности — SST (Shear Stress Transport). Вычисления производились с учетом эффекта плавучести.

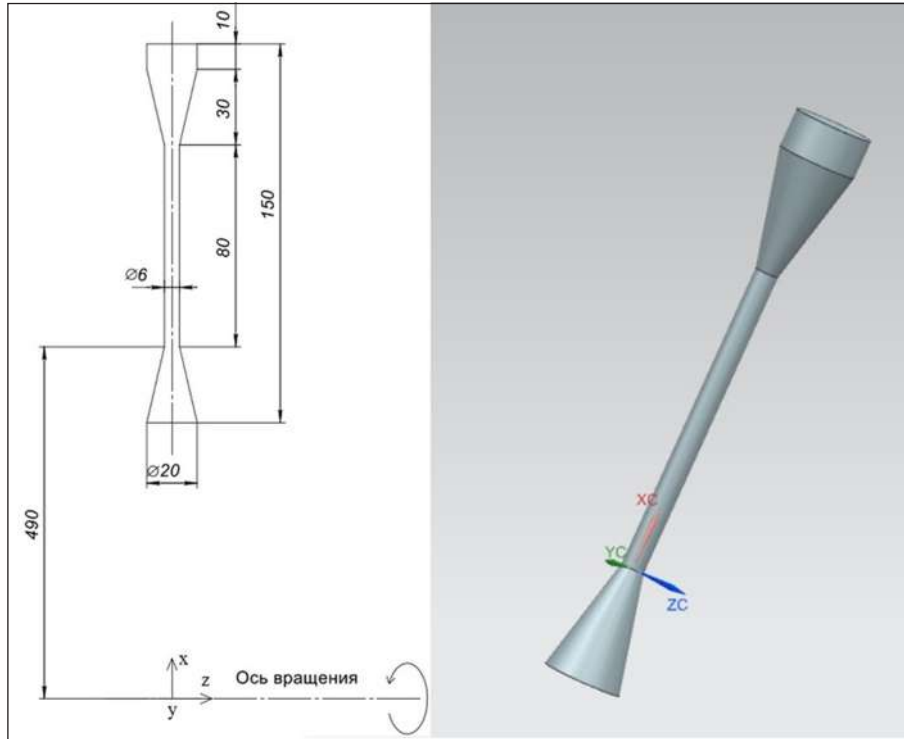


Рис. 1. Модель вращающегося канала

Для проверки корректности выбранной модели был осуществлен тестовый расчет модели охлаждающего канала, в котором проводились экспериментальные исследования вторичных течений [3].

В результате теоретического анализа выявлено, что вектор скорости воздуха во вращающемся канале направлен не строго параллельно стенкам канала, а имеет тангенциальную составляющую. Данное явление объясняется действием на поток воздуха силы Кориолиса ($F_k = -2\rho\omega \times v$). Вектор действия силы направлен противоположно вектору окружной скорости. Подробное описание геометрических параметров модели канала, процесса выбора расчетной сетки, верификации расчетной модели изложено в [2].

С целью определения влияния различных факторов (частота вращения канала, радиус вращения, форма поперечного сечения, диаметр поперечного сечения) на интенсивность вихревого течения, формирующегося под действием силы Кориолиса, в настоящем исследовании проведены соответствующие CFD-расчеты.

Влияние изменения частоты вращения канала на интенсивность вихревого течения. Сравнивались три режима течения воздуха через вращающийся канал с различными частотами вращения: $n = 5000$; 7400 и 9000 об/мин.

На рис. 2 изображен график изменения относительной тангенциальной скорости вблизи стенки ($v_{\text{т.отн}} = v_m/v_{\text{ср}}$) от относительной длины канала ($l_{\text{отн}} = y/d$). Вычисления тангенциальной скорости

осуществлялись на расстоянии 0,1 мм от стенки канала. Из рис. 2, а видно, что с увеличением частоты вращения канала интенсивность вихревого течения повышается. Это обусловлено тем, что возрастает центробежная сила, действующая на поток воздуха, и, как следствие, усиливается давление в канале, которое приводит к уменьшению средней скорости в нем, при этом снижается импульс потока воздуха в радиальном направлении и увеличивается влияние на структуру течения силы Кориолиса, направленной противоположно окружной скорости канала. С увеличением частоты вращения канала растет величина этой силы, что также приводит к интенсификации вихревого течения.

Влияние изменения радиуса вращения канала на интенсивность вихревого течения. Изучались три случая течения воздуха через вращающийся канал с различными радиусами вращения 0,49; 0,3 и 0,65 м.

На рис. 2, б представлены три графика зависимости относительной тангенциальной скорости от относительной длины канала при различных радиусах вращения канала. Из данных графиков следует, что изменения радиуса вращения практически не влияет на интенсивность вихревого течения, а перемена величины тангенциальной скорости не превышает 3%, стабильным остаётся характер вторичных течений.

Влияние диаметра поперечного сечения канала на интенсивность вихревого течения. Сравнивались три случая течения воздуха через вращающийся канал диаметрами 5; 6 и 7 мм.

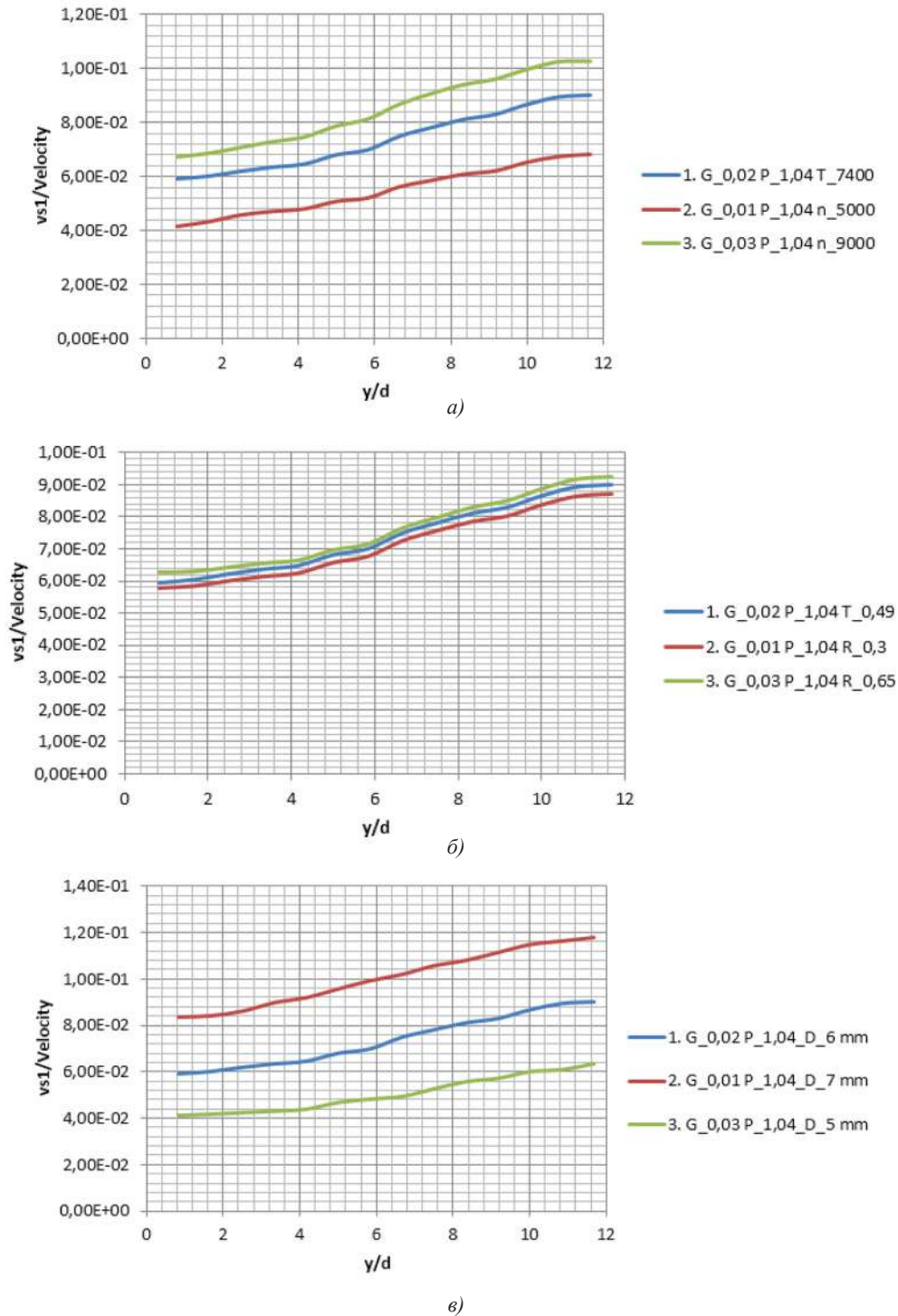


Рис. 2. Зависимость относительной тангенциальной скорости от относительной длины во вращающемся канале при различных частотах вращения канала (а), радиусах вращения канала (б), диаметрах поперечного сечения канала (в)

Из рис. 2, в видно, что с увеличением диаметра поперечного сечения канала интенсивность вихревого течения растет. Это связано с повышением средней скорости в канале при уменьшении площади его поперечного сечения.

Влияние положения канала относительно оси вращения на интенсивность вихревого течения.

Проведено два дополнительных расчета с различными вариантами расположения канала относительно оси вращения: канал наклонен на 15° относительно радиуса в плоскости, на которой лежит ось вращения (рис. 3, а); канал наклонен на 15° относительно радиуса в плоскости, перпендикулярной оси вращения (рис. 3, б). Результаты данных вычислений сопостав-

лялись с расчетом канала, ось которого совпадает с радиусом.

Графики изменения зависимости относительной тангенциальной скорости от относительной длины во вращающемся канале при различных положениях канала к оси вращения представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в случае поворота канала в плоскости, на которой лежит ось вращения (линии 2.1 и 2.2, соответствующие рис. 3, а), интенсивность вихревого течения растет по сравнению с базовым вариантом. Поворот канала приводит к несимметричности вихревых течений (рис. 5), что объясняется смещением вектора силы Кориолиса относительно оси.

Наблюдается различная тангенциальная скорость около боковых стенок канала. На рис. 4 линии 2.1 и 2.2 показывают изменения относительной тангенциальной скорости вблизи противоположных боковых стенок. Точки, в которых производились замеры, отображены на рис. 5. Из рисунка следует, что интенсивность вторичных течений меньше около боковой стенки, в сторону которой осуществлен наклон канала.

В канале, повернутом в плоскости, перпендикулярной оси вращения (линия 3, соответствующая рис. 3, б), относительная тангенциальная скорость на входном участке ($y/d = 0,8$) значительно меньше, чем в базовом варианте (см. рис. 4). На начальном участке канала ($y/d = 0,8-4$) увеличение скорости вторичных течений происходит интенсивнее.

Влияние формы поперечного сечения канала на интенсивность вихревого течения. С целью исследования характера вторичных течений во вращающемся канале с квадратным поперечным сечением выполнены два дополнительных расчета. Площадь сечения квадратного канала равна площади сечения

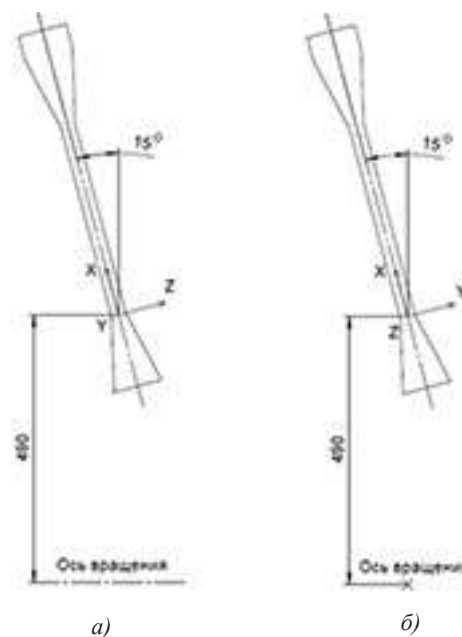


Рис. 3. Положение канала относительно оси вращения: а) ось канала повернута на 15° относительно радиуса в плоскости оси вращения; б) ось канала повернута на 15° относительно радиуса в плоскости, перпендикулярной оси вращения

круглого канала базового варианта. В первом случае ось вращения канала проходит через середины противоположных сторон квадрата (рис. 6, а), во втором случае — через диагональ квадрата (рис. 6, б).

На рис. 7 изображены вторичные сечения в каналах квадратного сечения на расстоянии 60 мм от корневого сечения. Из рисунка видно, что в случае, когда ось вращения проходит через середины противополо-

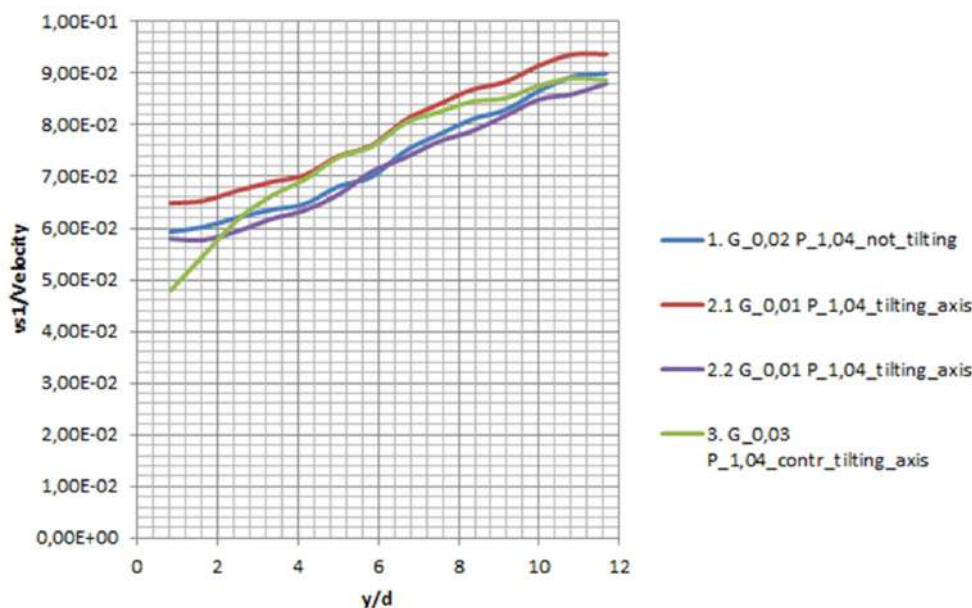


Рис. 4. Зависимость относительной тангенциальной скорости от относительной длины во вращающемся канале при различных положениях канала

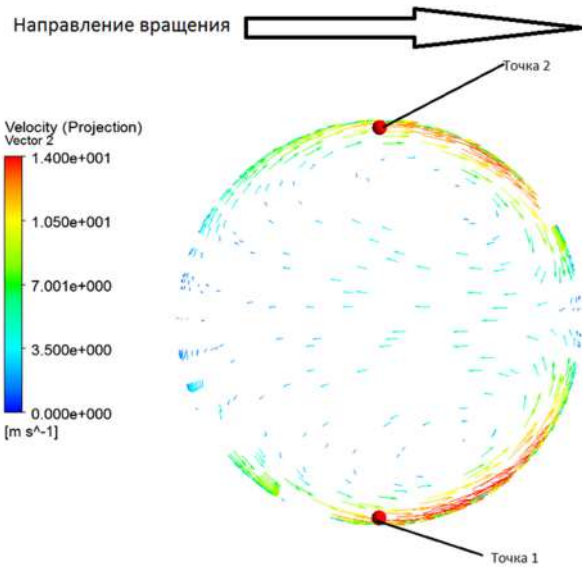


Рис. 5. Тангенциальная составляющая скорости в поперечном сечении вращающегося канала, повернутого на 15° относительно радиуса в плоскости, на которой лежит ось вращения, $L = 60$ мм

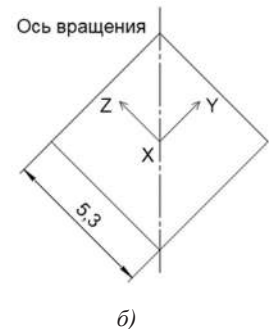
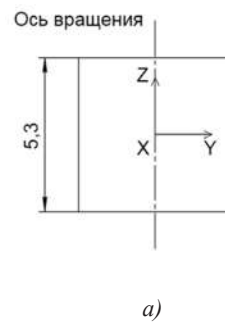


Рис. 6. Вращающийся канал квадратного сечения: ось вращения канала проходит через середины противоположных сторон квадрата (а); ось вращения канала проходит через диагональ квадрата (б)

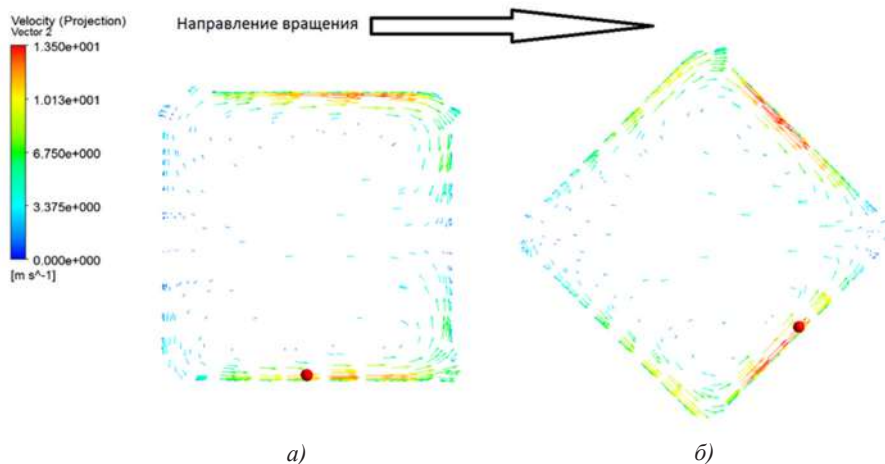


Рис. 7. Тангенциальная составляющая скорости в каналах с квадратным поперечным сечением: ось вращения канала проходит через середины противоположных сторон квадрата (а); ось вращения канала проходит через диагональ квадрата (б), $L = 60$ мм

ложных сторон канала (рис. 7, а), вихревое течение практически отсутствует около задней стенки канала, а во время прохождения её через диагональ квадрата (рис. 7, б) вихревое течение наблюдается около всех четырех стенок канала.

На рис. 8 представлены три графика зависимости относительной тангенциальной скорости от относительной длины вращающегося канала: линия 1 — канал круглого сечения; линия 2 — канал квадратного сечения, ось вращения проходит через диагональ квадрата; линия 3 — канал квадратного сечения, ось вращения проходит через середины противоположных сторон квадрата.

В обоих случаях канала с квадратным сечением на входных участках наблюдается повышенная интенсивность вторичных течений, что обусловлено образованием вихря, вызванного изменением площади сечения и формой канала. На участке $y/d = 0,8–2,5$ влияние данного вихря ослабевает, что приводит к уменьшению тангенциальной составляющей скорости. На участке канала $y/d = 2,5–11$ главным фактором, который влияет на формирование вторичных течений, является сила Кориолиса, увеличивающая интенсивность вторичных течений.

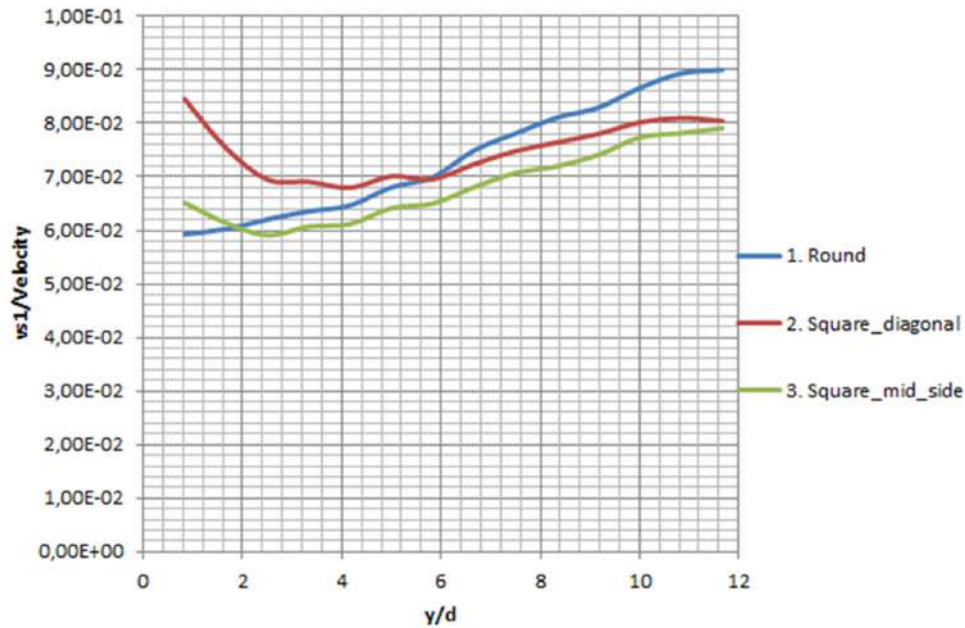


Рис. 8. Зависимость относительной тангенциальной скорости от относительной длины во вращающемся канале при различных формах поперечного сечения

ВЫВОДЫ. 1. Проведены численные исследования вихревого течения во вращающемся канале, моделирующем охлаждаемую рабочую лопатку газовой турбины, и определено влияние геометрических факторов на структуру этого течения.

2. Величина радиуса вращения канала практически не оказывает влияния на интенсивность вихревого течения.

3. Возрастание частоты вращения канала за счет увеличения диаметра поперечного сечения приводит к повышению интенсивности вторичных течений в каналах охлаждаемых лопаток.

4. В случае поворота канала в плоскости, на которой лежит ось вращения, интенсивность вихревого течения растет. Также в этом случае имеет место различная тангенциальная скорость около боковых стенок канала.

5. Для канала с квадратным поперечным сечением, когда ось вращения проходит через середины противоположных сторон, вихревое течение практически отсутствует около задней стенки канала, а в случае её прохождения через диагональ квадрата вихревое течение наблюдается около всех четырех стенок канала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст] / А. А. Халатов, В. В. Романов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Д. Северин. — К. : Институт технической теплофизики НАН Украины, 2010. — 317 с.
- [2] Шманенко А. И. Образование вихревого течения во вращающемся канале и влияние на его интенсивность режимных факторов [Текст] / А. И. Шманенко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2017. — №1.
- [3] Elfert M. PIV-Measurement of secondary flow in a rotating two-pass cooling system with an improved sequencer technique [Text] / M. Elfert, M. Schroll, W. Förster // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010. — Paper GT-2010-23510. — 13 p.
- [4] Huh M. Influence of Channel Orientation on Heat Transfer in a Two-Pass Smooth and Ribbed Rectangular Channel (AR=2:1) under Large Rotation Numbers [Text] / M. Huh, J. Lei, J.C. Han // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010. — Paper GT2010-22190. — 13 p.
- [5] Lei J. Effect of rib spacing on heat transfer in two pass rectangular channel (AR=2:1) at high rotation number [Text] / J. Lei, J.C. Han, M. Huh // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. — Paper GT2011-45926. — 11 p.
- [6] Schroll M. Investigation of the effect of rotation on the flow in a two-pass cooling system with smooth and ribbed walls using PIV [Text] / M. Schroll, L. Lange, M. Elfert // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011. — Paper GT2011-46427. — 12 p.
- [7] Wagner J. H. Heat Transfer in Rotating Serpentine Passages With Smooth Walls [Text] / J. H. Wagner, B. V. Johnson, F. C. Kopper // ASME J. of Turbomachinery, 1991. — Vol. 113. — Pp. 321–330.

© А. І. Шманенко

Надійшла до редколегії 22.02.2017
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. С. І. Сербін