

УДК 62-225.864.9
DOI: 10.12737/20248

Е.В. Тулубенский, А.М. Дроконов, А.В. Осипов

СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДКОВООБРАЗНЫХ ВИХРЕЙ В СОПЛОВЫХ АППАРАТАХ ТУРБОМАШИН

Проанализированы аэродинамические характеристики исходной и модернизированных конструкций соплового аппарата турбомшины с использованием метода конечных элементов в системе автоматизированного проектирования Autodesk Simulation CFD 2014 360.

Ключевые слова: турбомашинa, сопловой аппарат, перфорированный профиль, потери энергии, метод конечных элементов, Autodesk Simulation CFD.

E.V. Tulubensky, A.M. Drokonov, A.V. Osipov

INTENSITY DECREASE OF HORSESHOE WHIRLWINDS IN NOZZLE INSTRUMENTS OF TURBOMACHINES

In this research work there is offered an original method for nozzles designing allowing the structure improvement of the flow arriving in a distributor by means of manufacturing nozzle blades with a perforated input edge and a damping chamber located behind it or with cuts on the end areas of a blade. The analysis of aerodynamic properties of initial and updated variants of blades (perforation, making cuts and shears) is carried out with the use of the finite element method in the computation system of automated designing Autodesk Simulation CFD 2014 360. The analysis was carried out with the consideration of different grid models beginning with the simplest (from 500 000 finite elements) and ending with complex models with the closeness of finite elements near a blade profile (up to 2,000 000 finite elements). The

research results show that the lowest level of velocities is observed in the variants with a perforated wall and longitudinal cuts. In such a way, these variants of embodiment allow decreasing considerably the intensity of horseshoe whirlwinds (up to 18-20%). At the analysis of pressure distribution in the output section in four variants of blade end area embodiment one can observe that in variants with a perforated wall and longitudinal cuts are seen the best values: in connection with lower pressure loss their effectiveness is on average about 0.2% higher, than the effectiveness of the initial model. The variants offered of the embodiment ensure also the decrease of vibro-acoustic activity of a stage.

Key words: turbomachine, nozzle instrument, perforated profile, power waste, finite element method, Autodesk Simulation CFD.

На сегодняшний день более 85% вырабатываемой в мире электроэнергии производится при помощи паротурбинных и газотурбинных двигателей. Поэтому поиск решений физико-технических проблем в данной области является весьма актуальной задачей энергетики. Одной из них является создание аэродинамически совершенных лопаточных аппаратов. Современные программные комплексы и системы автоматизированного проектирования позволяют исследовать различные варианты конструктивного оформления турбинных решеток с целью поиска оптимального решения. Вместе с тем анализ их аэродинамических качеств свидетельствует, что энергетические характеристики лучших вариантов сопловых каналов лишь незначительно превосходят эффективность, дос-

тигнутую опытным путем ранее, причем уровень её остается недостаточно высоким. Это свидетельствует о необходимости поиска новых подходов к решению рассматриваемой проблемы.

В настоящем исследовании предложен оригинальный метод проектирования сопел, позволяющий улучшить структуру поступающего в направляющий аппарат потока путем выполнения сопловых лопаток с перфорированной входной кромкой и расположенной за ней демпфирующей камерой (рис. 1). Такое конструктивное решение позволит снизить потери энергии в диафрагме за счет уменьшения толщины пограничного слоя вдоль сферы входной кромки и поверхности профиля сопловых лопаток (рис. 2).

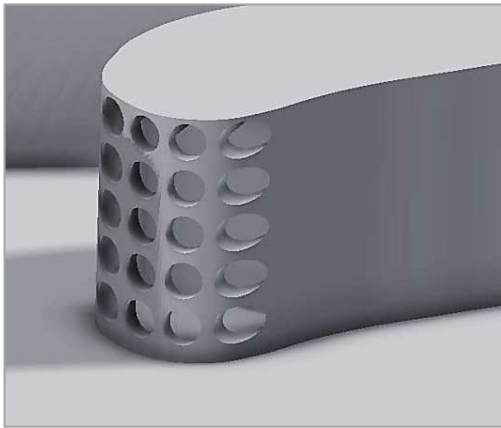


Рис. 1. Перфорированная поверхность входной кромки лопатки, соединяемая с внутренней камерой

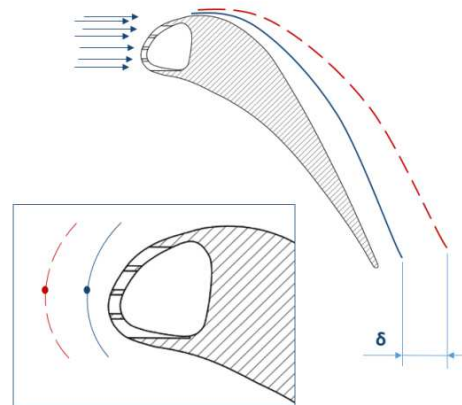


Рис. 2. Снижение толщины пограничного слоя: - - - - без камеры; — — с камерой

Снижение толщины пограничного слоя в данной конструкции можно ожидать за счёт частичного снижения интенсивности подковообразного вихря, возникающего на входной кромке лопатки. Набегая на лопатку, часть потока в результате торможения начинает смещаться в обратном направлении. Так как полное давление в нижних слоях пограничного слоя на торцевой стенке меньше, то возникает градиент давления, направленный от торцевой стенки. Из верхних слоев поток

вдоль входной кромки движется к торцевой стенке, а затем поворачивается вдоль нее навстречу основному потоку и, взаимодействуя с ним, преобразуется в подковообразный вихрь [1;2]. Обтекая лопатку, этот вихрь разветвляется на два вихревых шнура, которые своими концами уходят в межлопаточные каналы, взаимодействуя с основным потоком (рис. 3). При использовании перфорированной стенки подковообразный вихрь разветвляется и попадает в специальную камеру (рис. 4).

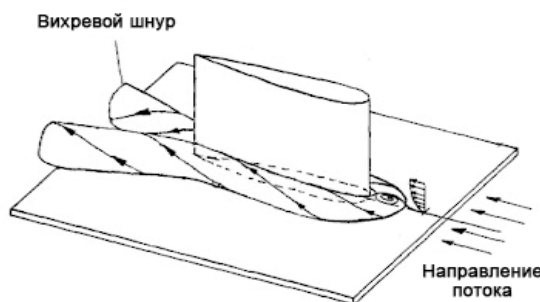


Рис. 3. Схема образования и разделения подковообразного вихря

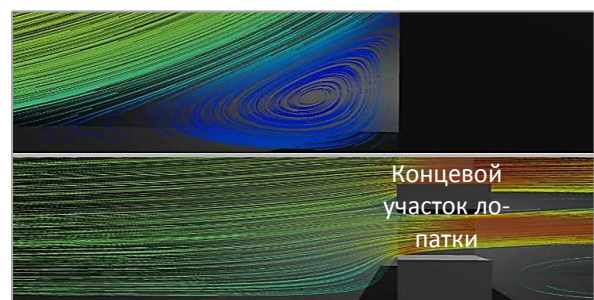


Рис. 4. Образование подковообразного вихря в исходной конструкции лопатки (сверху) и его разбиение при использовании перфорированной стенки (снизу)

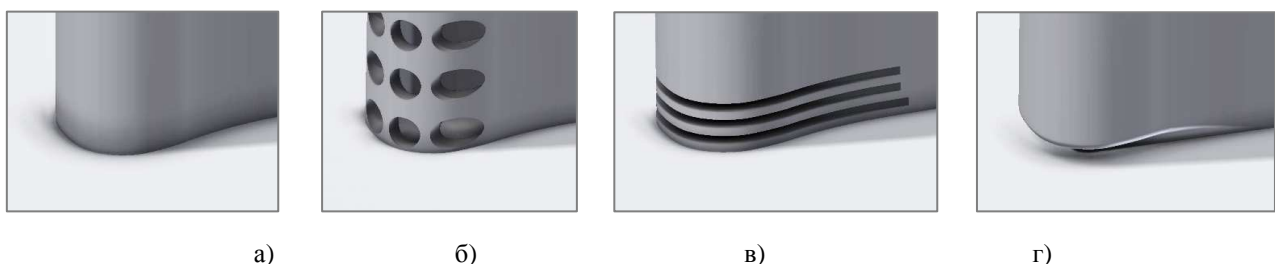


Рис. 5. Исследуемые варианты конструктивного исполнения концевых участков сопловых лопаток: а – исходный вариант; б – перфорированная стенка; в – продольные вырезы; г – срез

Помимо предложенного варианта разбиения подковообразного вихря спомощью перфорированной стенки также рассмотрен вариант выполнения на концевых участках лопатки щелей и среза специальной формы (рис. 5).

Анализ аэродинамических показателей исходного и модернизированных вариантов лопаток выполнен с использованием метода конечных элементов в расчетной системе автоматизированного проектирования AutodeskSimulationCFD 2014 360.

Проведение аэродинамического расчета потока в реальной геометрической модели всей сопловой решетки является сложной задачей и требует больших затрат ресурсов ЭВМ. Поэтому целесообразно использовать упрощенную расчетную модель, представляющую собой плоскую решетку, состоящую из трех лопаток [3].

Расчетная модель была создана в системе автоматизированного проектирования AutodeskInventorProfessional 2013 и затем экспортирована в среду SimulationCFD, где уже непосредственно проводился анализ аэродинамических характеристик. В первую очередь задавались материалы и их свойства, затем задавались входные и выходные граничные условия.

Следует отметить, что SimulationCFD базируется на использовании так называемых облачных вычислений, т.е. расчёт проводится не на локальном компьютере, а на сервере компании-провайдера. Данные о решаемой задаче передаются по сети на удаленный компьютер, проводится реше-

ние задачи, а затем результаты расчета возвращаются обратно. Благодаря этой технологии открывается возможность выполнять вычисления на сложных расчетных моделях, для осуществления которых потребовалось бы иметь в наличии дорогостоящую и мощную ЭВМ.

Еще одним преимуществом данной расчетной системы является технология «MeshAdaptation», позволяющая автоматически на основании ряда расчетов шаг за шагом разбить сетку конечноэлементной модели в местах повышенного градиента параметров потока и тем самым получить более точные результаты.

Анализ проводился при рассмотрении различных сеточных моделей, начиная с простейших (от 500 000 конечных элементов) и заканчивая сложными моделями со сгущением конечных элементов возле профиля лопатки (до 2 млн конечных элементов). Одна из конечноэлементных моделей внутреннего объема представлена на рис. 6а. Следует отметить, что пограничный слой разбивается дополнительно на 3-15 элементарных объемов, в зависимости от настроек (рис. 6б), что приповышает точность результатов анализа [5;6]. Основной элемент сетки – тетраэдр, элемент объема пограничного слоя – призма.

Картины обратных течений в исходном и модернизированных вариантах представлены на рис. 7. На рис. 8 представлены картины течений рабочего тела непосредственно в камере перфорированного варианта входной кромки лопатки.

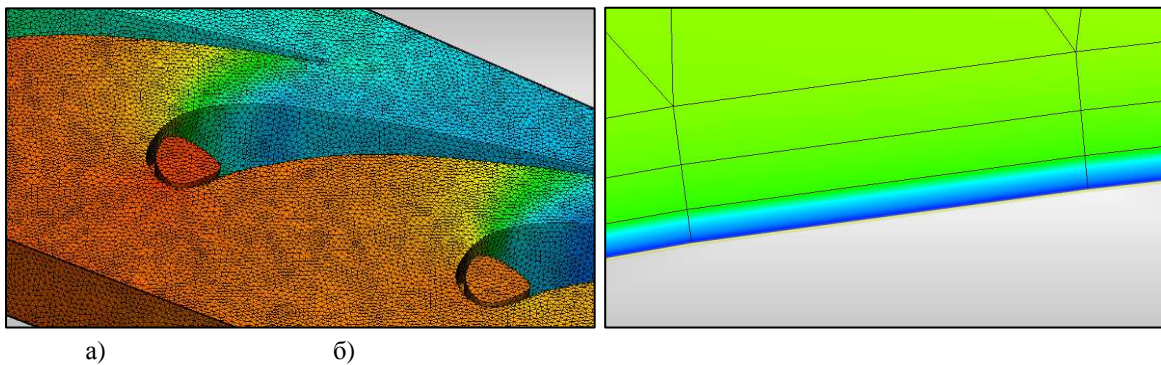


Рис. 6. Отображение конечноэлементной модели в SimulationCFD (а) и увеличенный вид разбиения пограничного слоя (б)

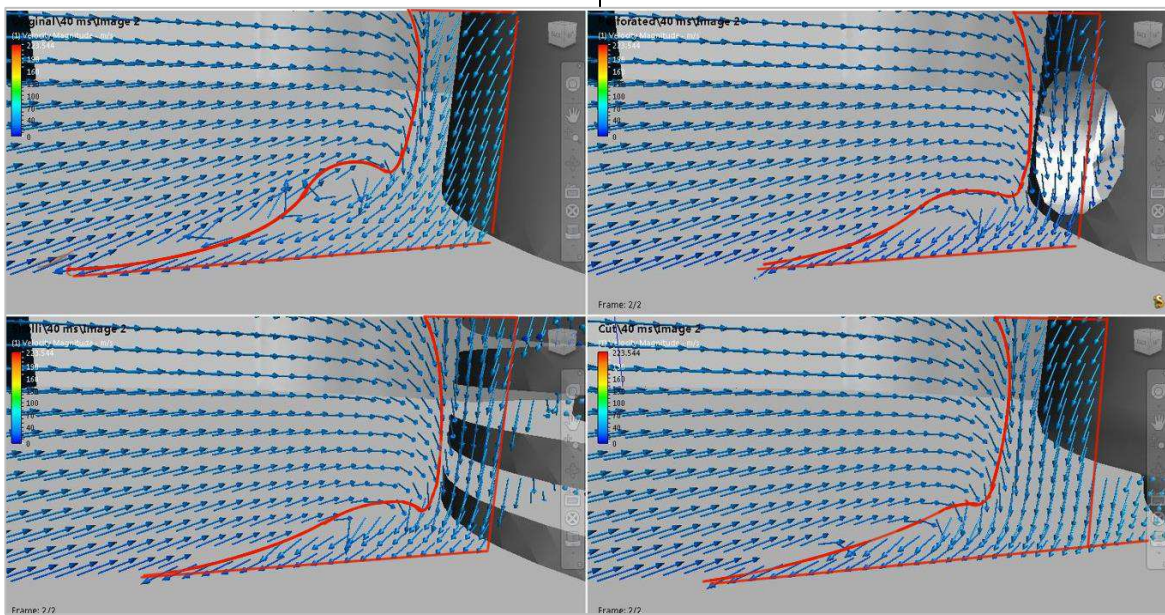


Рис. 7. Область обратных течений в районе входной кромки в каждом из конструктивных вариантов

Рассматривая структуру течения потока в демфирующей камере, можно заключить, что отверстия на краях входной кромки, через которые данный поток выходит из камеры, необходимо выполнять под углом, близким к углу атаки основного потока, чтобы оказывать на него минимальное воздействие. Кроме того, в лопатках относительно малой высоты поток в камере выходит в окружающую среду преимущественно через концевые отверстия (возле торцевых поверхностей) в область вторичных течений, что несколько увеличивает концевые потери. В лопатках же

относительно большой высоты поток выбивается из камеры практически через каждое отверстие по всей высоте и попадает как в область вторичных течений, так и в основной поток, что сказывается уже не только на концевых потерях, но и на профильных. Это свидетельствует о целесообразности использования предложенной конструкции преимущественно в лопатках относительно малой высоты.

Результаты моделирования свидетельствуют, что предложенная конструкция позволяет снизить толщину пограничного слоя на выходной кромке до 20% (рис. 9).

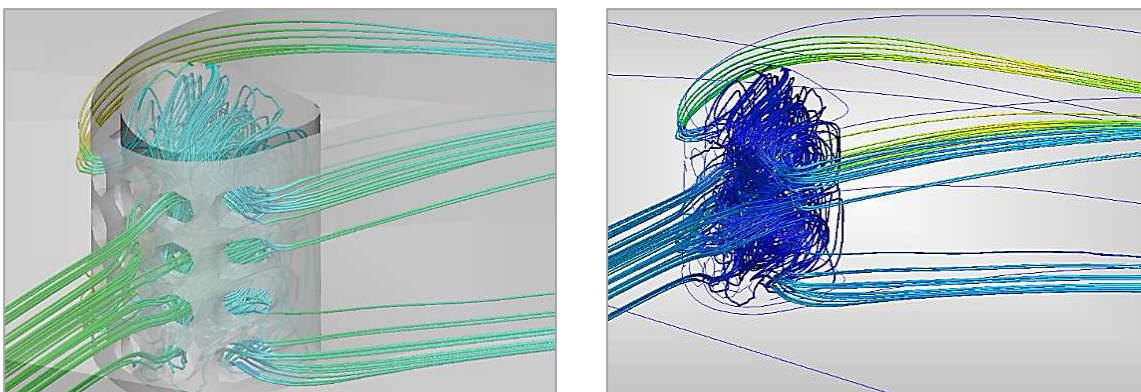
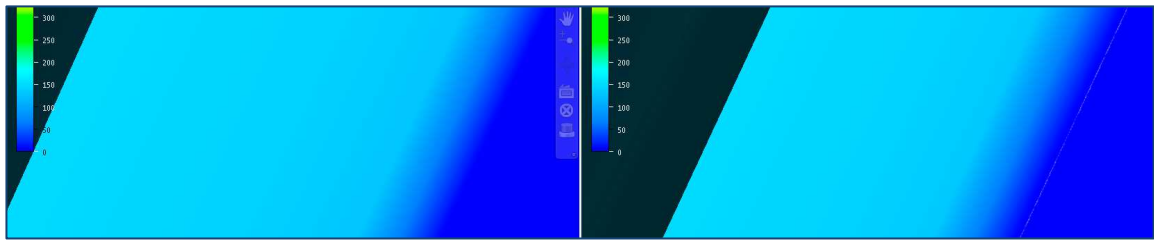


Рис. 8. Визуализация течения в камере соплового аппарата



а) б)

Рис. 9. Результаты моделирования на мелкой сетке (толщина пограничного слоя):
а – исходный вариант лопатки; б – модернизированный вариант

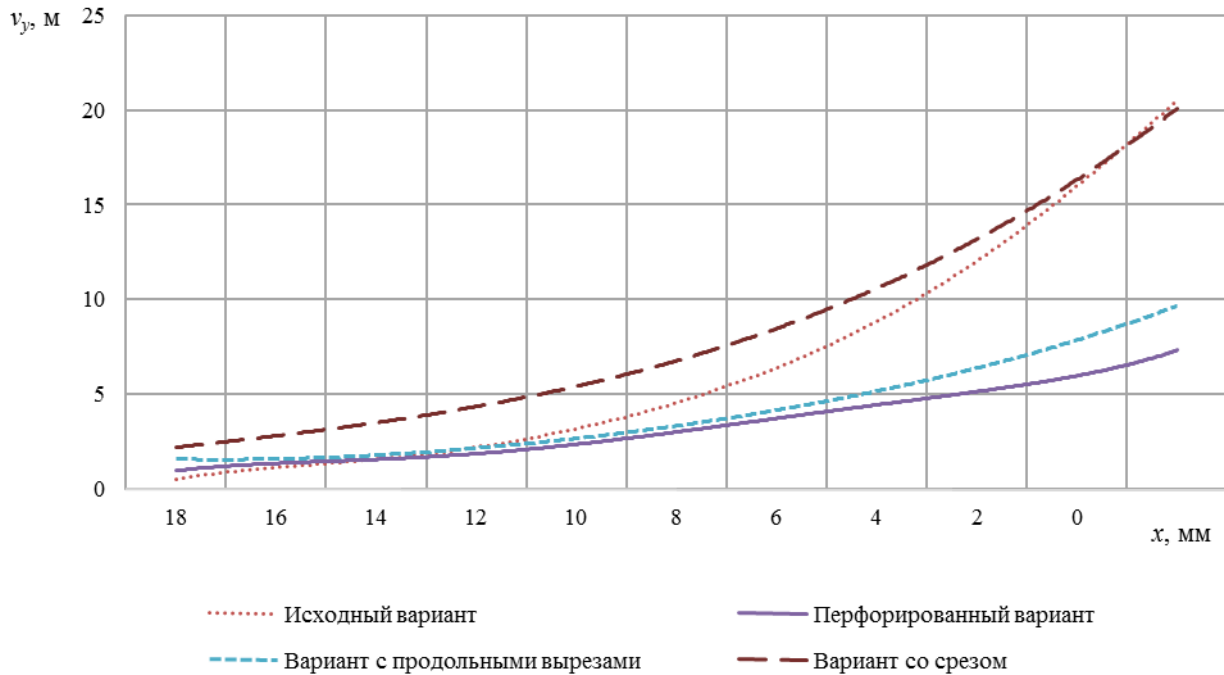


Рис. 10. Зависимость скорости радиальных течений v_r от расстояний до входной кромки

На рис. 10 проиллюстрирована зависимость скорости радиальных течений от расстояния до концевых участков входной кромки. Как видно, наиболее низкий уровень скоростей наблюдается в вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами. Таким образом, эти варианты конструктивного исполнения позволяют значительно снизить интенсивность подковообразных вихрей.

На рис. 11 представлено распределение давления в выходном сечении в 4 ва-

риантах конструктивного исполнения концевых участков лопатки. В вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами наблюдаются наилучшие показатели: в связи с более низкими потерями давления их эффективность в среднем примерно на 0,2% выше, чем эффективность исходной модели.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенные варианты конструктивного исполнения лопаточного аппарата позволяют снизить концевые потери потока в решетке за счет снижения интенсивности подковообразного вихря и соответствующего уменьшения толщины пограничного слоя на поверхности лопатки.

2. Наибольший эффект от снижения

концевых потерь (в сравнении с исходным вариантом) достигается в вариантах с перфорированной стенкой и продольными вырезами (в решетках малой веерности).

3. Предложенная конструкция обеспечивает снижение виброакустической активности ступени [4].

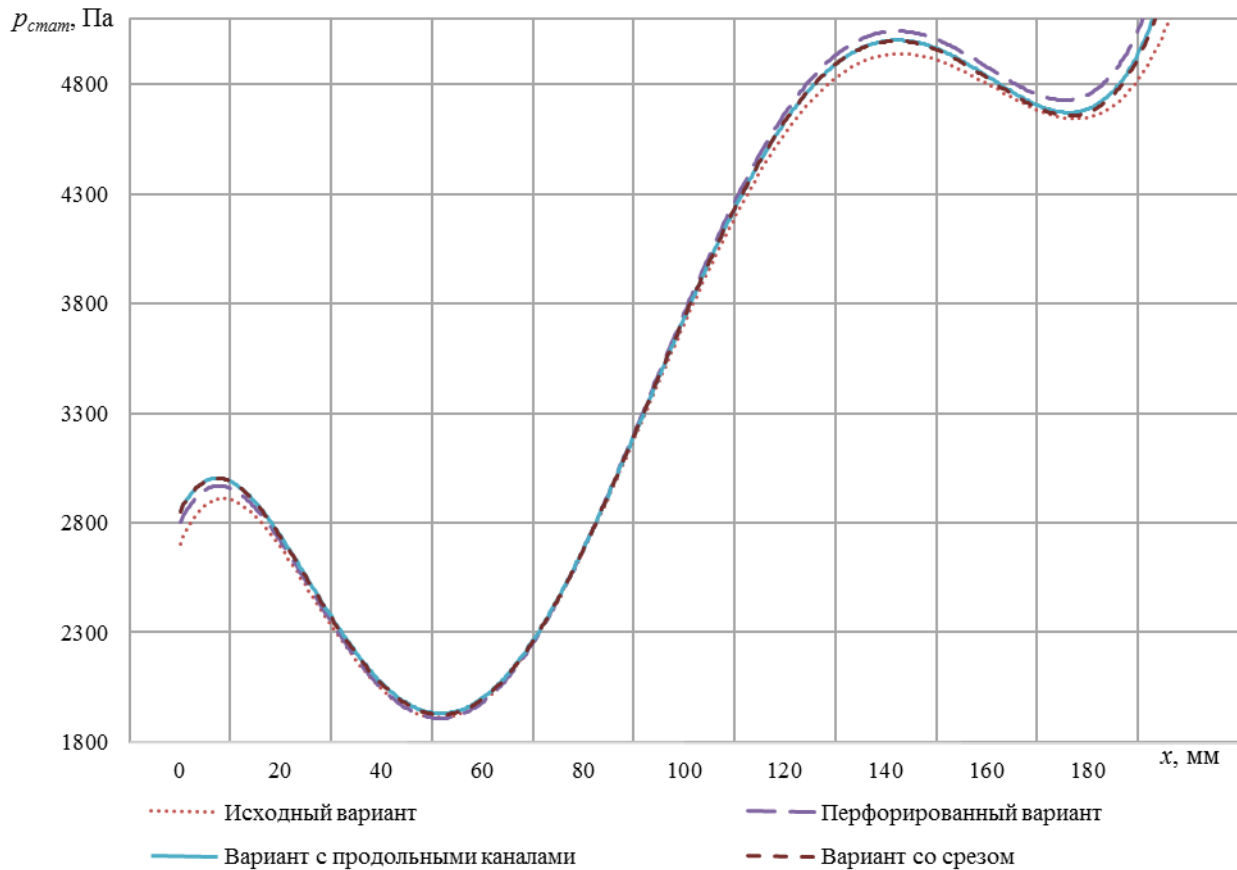


Рис. 11. Распределение статического давления в выходном сечении



Рис. 12. 3D-принтер (модель «UP! mini»)

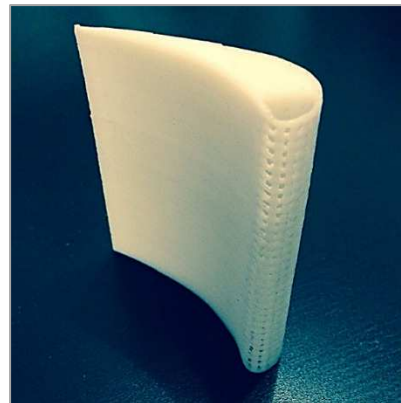


Рис. 13. Опытный образец лопатки

В настоящее время ведется подготовка физического эксперимента (продувка моделей лопаток, распечатанных на 3D-принтере (рис. 12,

13), в аэродинамической трубе), что позволит повысить достоверность результатов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh, G. Development of three-dimensional stage viscous time marching method for optimization of short height stages / G. Singh, P. J. Walker, B. R. Haller // *Turbomachinery—fluid dynamics and thermodynamics aspects computational methods: 1st European conference.*— 1995. — P. 157-179.
2. Дейч, М.Е. *Гидрогазодинамика* / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 384 с.
3. Норри, Д. *Введение в метод конечных элементов* / Д. Норри, Ж. де Фриз. — М.: Мир, 1981. — 364 с.
1. Singh, G. Development of three-dimensional stage viscous time marching method for optimization of short height stages / G. Singh, P. J. Walker, B. R. Haller // *Turbomachinery—fluid dynamics and thermodynamics aspects computational methods: 1st European conference.*— 1995. — P. 157-179.
2. Deutsch, M. E. *Hydrogasdynamics* / M. E. Deutsch, A. E. Zaryankin. — M.: Energoatomizdat, 1984. — pp. 384.
3. Norry, D. *Introduction into Finite Element Method* / D. Norry, J. de Freeze. — M.: Mir, 1981. — pp. 364.
4. Дроконов, А.М. *Виброакустическая активность и эксплуатационная безопасность рабочих колес турбомашин: учеб. пособие* / А.М. Дроконов, Т.А. Николаева. — Брянск: БГТУ, 2010. — 96 с.
5. Запись вебинара, освещающего возможности и принципы работы Autodesk Simulation CFD. — <http://www.youtube.com/watch?v=nf0a5jNnpBc>.
6. Официальная справка Autodesk Simulation CFD. — http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_CFD/enu/2013.
4. Drokonov, A. M. *Vibroacoustic Activity and Operating Safety of Turbomachine Impellers: Manual* / A. M. Drokonov, T. A. Nikolayeva. — Bryansk: BSTU, 2010. — pp. 96.
5. Records of webinar showing possibilities and principles of functioning Autodesk Simulation CFD. — <http://www.youtube.com/watch?v=nf0a5jNnpBc>.
6. Official information of Autodesk Simulation CFD. — http://wikihelp.autodesk.com/Simulation_CFD/enu/2013.

Статья поступила в редколлегию 29.12.2015.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Обозов А.А.*

Сведения об авторах:

Тулубенский Евгений Викторович, аспирант БГТУ, кафедра «Тепловые двигатели», e-mail: ev-gen.tulubensky@gmail.com.

Дроконов Алексей Михайлович, к.т.н., профессор кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

Tulubensky Eugeny Victorovich, Post graduate student of BSTU, Dep. "Heat Engines", e-mail: ev-gen.tulubensky@gmail.com.

Drokonov Alexey Mikhailovich, Can.Eng., Prof. of the Dep. "Heat Engines" BSTU, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

Осипов Александр Вадимович, к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели» БГТУ, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.

Osipov Alexander Vadimovich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Heat Engines", BSTU, e-mail: heat@tu-bryansk.ru.