

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИНГЛЕТА НЕБАНДАЖИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ

© М. Л. ЖИВИРИХИН, А. Е. РЕМИЗОВ, 2019

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Приведен пример оптимизации формы винглета переменной толщины для рабочей лопатки турбины. Исследование проведено с применением современных методов численного моделирования (ANSYS CFX) и оптимизации (IOSO NM), основанных на алгоритме поверхностей отклика. Для оптимизации геометрии винглета разработана параметрическая модель с возможностью задания переменного утолщения профиля, что позволило минимизировать по массе периферийную часть лопатки при сохранении высокой эффективности уплотнения радиального зазора. Приведено сравнение рабочих лопаток с плоской законцовкой и различными винглетами относительно КПД ступени и площади торцевой части лопатки.

ТУРБИНА, РАБОЧАЯ ЛОПАТКА, РАДИАЛЬНЫЙ ЗАЗОР, ВИНГЛЕТ, ОПТИМИЗАЦИЯ

OPTIMIZATION RESEARCH OF A SHROUDLESS ROTOR BLADE WINGLET

© M. L. ZHIVIRIKHIN, A. E. REMIZOV, 2019

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education
«P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University»

The paper introduces an example of form optimization for a variable-thickness winglet of a turbine rotor blade. The research was conducted using modern methods of numerical modeling (ANSYS CFX) and optimization (IOSO NM) based on a response surfaces algorithm. In order to optimize the winglet's geometry a parametrical model with capability of the profile thickness variation was developed which allowed minimization of the blade peripheral part weight with maintaining high performance characteristics of radial-clearance seal. The paper also contains comparison of flat-tip rotor blading with different winglets as far as stage efficiency and blade edge part area are concerned.

TURBINE, ROTOR BLADING, RADIAL-CLEARANCE SEAL, WINGLET, OPTIMIZATION

В последнее время наиболее значимые достижения в области газодинамического совершенствования турбин проявляются на пути снижения негативного влияния неустраняемых паразитных эффектов, таких как генерирование в ступени вторичных и торцевых потерь.

Для турбин высокого давления перспективным средством снижения торцевых потерь в области радиального зазора рабочего колеса является частичное бандажирование лопатки, получившее название винглета (winglet). Винглеты (рис. 1) применяются на периферии аэродинамических поверхностей для снижения потерь кинетической энергии перетечки газа через радиальный зазор за счёт уменьшения градиента давления на периферийном участке лопатки. При этом снижается расход газа через радиальный зазор и уменьшается интенсивность индуцированного вихря перетечки газа с корытца на спинку лопатки.

Начиная с 2000-х годов начали появляться публикации результатов исследования влияния на газодинамическую эффективность турбинной ступени или её рабочего колеса различных форм и

конфигураций винглетов [2 – 5]. В вышеупомянутых публикациях приведен качественный анализ геометрической конфигурации винглетов, при этом не уделено должного внимания количественной оценке, т. е. оценке влияния локального утолщения спинки и корытца в отдельности на эффективность ступени турбины, не приведены граничные значения локальных утолщений и рекомендации к оптимальной конфигурации винглета. Ранее авторами предложен метод параметрического исследования геометрической конфигурации винглетов с равномерным утолщением профиля [1], в котором сформированы рекомендации к оптимальному проектированию винглета.

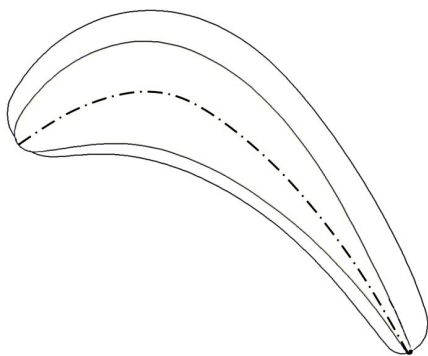


Рис. 1. Модель рабочей лопатки с неоптимизированным винглетом [1]

Целью данной статьи является исследование возможности дальнейшего совершенствования предложенного авторами метода [1] газодинамического проектирования рабочей лопатки с винглетом, а именно разработка оптимизационной модели винглета с неравномерным утолщением профиля вдоль спинки и вдоль корытца, который позволит снизить массу периферийной части рабочей лопатки при максимальном сохранении высоких критериев эффективности уплотнения радиального зазора, свойственных винглету с постоянной шириной.

Разработка винглета переменной ширины приводит к многократному усложнению процесса проектирования и требует больших временных затрат. Кроме того, увеличение количества переменных в параметрической модели оказывает противоречивое влияние на параметры исследуемой ступени турбины, что дополнительно усложняет

процесс принятия рационального решения по геометрии винглета.

Решить данную проблему можно, применив метод многопараметрической оптимизации, основанный на совместном применении газодинамического решателя и программы-оптимизатора. С помощью созданной расчетной модели можно производить автоматизированный поиск геометрического облика винглета, обеспечивающего повышение КПД ступени при сохранении параметров расчетного режима турбины. В качестве оптимизатора (рис. 2) был использован комплекс IOSO NM, реализующий многокритериальный метод непрямого оптимизации на основе самоорганизации (Implicit optimization algorithm with self-organization). Данный алгоритм оптимизации является одним из наиболее совершенных в данное время, он вполне сопоставим по возможностям с генетическими алгоритмами. В основе работы алгоритма IOSO лежит анализ поверхности отклика целевой функции, а именно: для каждого парето-оптимального решения проводится план эксперимента, по результатам расчета которого выполняется построение аппроксимирующей целевой функции (поверхности отклика) и нахождение её экстремумов. В процессе оптимизации происходит постоянное накопление информации об исследуемом объекте для определения направления дальнейшего поиска. Для повышения эффективности применяется ряд эвристических процедур, которые направлены на адаптивное изменение максимального количества точек в плане эксперимента. Комплекс IOSO имеет развитые инструменты параллельных вычислений на вычислительных кластерах.



Рис. 2. Организация оптимизационного исследования

В качестве объекта исследования при решении поставленных задач было выбрано рабочее колесо модельной турбины [6], исследованной в техническом университете города Aachen (Германия), использованное авторами для параметрической оптимизации винглета с постоянной шириной. В [1] приведено достаточно подробное описа-

ние модельной турбинной ступени, выбранной в качестве объекта исследования.

Поиск оптимальной конфигурации винглета проводился в результате реализации оптимизационного исследования (рис. 2), основанного на совместном применении газодинамического решателя ANSYS CFX и оптимизатора IOSO [7].

В качестве варьируемых переменных были приняты локальные значения утолщения периферийного профиля рабочей лопатки, определяющие геометрию винглета со стороны спинки ($\Delta\text{СП}_{1-8}/t = 0 \dots 0,14$) и корытца ($\Delta\text{КОР}_{1-8}/t = 0 \dots 0,14$), где t – шаг решетки в периферийном сечении, а нижний индекс соответствует номеру координатной оси (рис. 3). Утолщение профиля задавалось по координате, направленной вдоль линии, нормальной к поверхности корытца или спинки и проходящей через одну из восьми точек, равномерно распределённых по длине средней линии периферийного профиля лопатки.

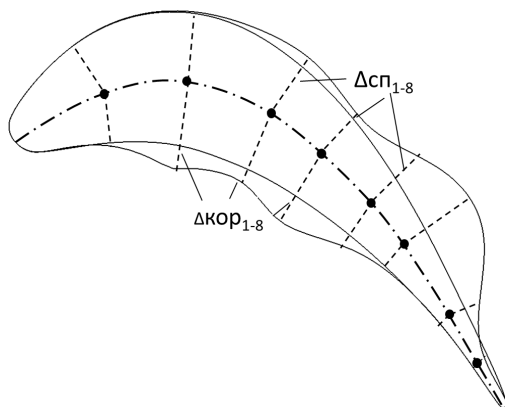


Рис. 3. Параметрическая модель винглета переменной толщины

В качестве целевых функций принимались: максимальное приращение КПД ступени ($\Delta\eta^*$, %) как критерий газодинамической эффективности и минимум дополнительной площади законцовки (винглета) рабочей лопатки (ΔF , %) как критерий массы периферийной части лопатки и дополнительный источник теплового потока в лопатку.

Параметрическая модель лопатки рабочего колеса разработана в среде 3D проектирования лопаточных венцов NUMECA AutoBlade [8]. Данная программа позволяет создавать параметрические модели лопаток, основываясь на выбранном геометрическом алгоритме и наборе переменных и констант.

Для построения сеточных моделей применен автоматизированный сеткопостроитель NUMECA AutoGRID5 [10]. Тип сетки – структурированная гексогональная, топология 4НО, моделирование венцов велось в осесимметричной постановке. Размер пристеночного слоя сетки 3,5 мкм, коэффициент роста ячеек 1,2...1,4. Моделирование осуществляется с учетом радиального зазора, который составлял 0,4 мм. Количество слоев сетки по высоте проточной части составляло 64 в области межлопаточного канала и 17 в области радиального зазора.

При расчете течения в рабочем колесе с винглетом был задействован коммерческий газодинамический решатель ANSYS CFX [10]. Основ-

ные настройки расчетной модели полностью соответствовали описанным в [1].

По результатам оптимизационного исследования найдено множество вариантов геометрической композиции винглета. Решения, соответствующие максимальному КПД ступени, объединены в репрезентативную выборку на рис. 4, где по оси абсцисс отмечается относительное изменение площади периферии рабочей лопатки, соответствующее исследованной конфигурации винглета, а по оси ординат – изменение КПД турбинной ступени. На рис. 4 нанесены две кривые:

– ОПТ (сплошная линия) соответствует максимальному приросту КПД ступени (она получена по результатам оптимизационного исследования ступеней с переменной шириной винглета);

– ПАРАМ (пунктирная линия) соответствует результатам параметрического исследования этой же ступени при постоянной ширине винглета, опубликованным авторами в статье [1].

Как видно из рис. 4, винглет с неравномерным утолщением является существенно эффективнее «равномерного» винглета. Можно пронаблюдать, что одинаковое повышение КПД $\Delta\eta^* = +0,22\%$ достигается при значительно меньшем приросте площади законцовки как следствие массы. Наблюдается выигрыш по площади законцовки до трех раз ($\Delta F_2 = 20,7\%/63,3\% = 3,05$ и $\Delta F_3 = 29,2\%/86,3\% = 2,96$).

Гибкость параметрической модели позволила в ходе оптимизации добавить утолщение только в местах с наиболее интенсивным, перпендикулярным течением относительно спинки периферийного профиля (угол $\Delta\beta$), рис. 5.

К наибольшему приросту КПД ступени приводит использование винглета со стороны спинки, до $\Delta\eta_{\text{сп}}^* = +0,18\%$ (рис. 4). Утолщение составило $\Delta\text{СП}/t < 0,09$ в районе выходной кромки лопатки.

Утолщение со стороны корытца не столь существенно влияет на КПД: $\Delta\eta_{\text{кор}}^* = +0,04\%$ (рис. 4). Утолщение составило $\Delta\text{КОР}/t < 0,06$ в районе середины корытца.

Варианты с приростом КПД выше $\Delta\eta^* = +0,22\%$ по линии ОПТ имеют чрезвычайно большие и утолщения и по своей конфигурации не реализуемые, в рассмотрение братья не будут.

Физическую природу воздействия винглета на течение газа в рабочем колесе турбинной ступени, обеспечивающего увеличение КПД ступени, наглядно иллюстрируют результаты численного моделирования течения (рис. 6). Винглет со стороны спинки лопатки обеспечивает увеличение КПД ступени в основном за счёт отвода индуцированного вихря перетечки газа через радиальный зазор от спинки лопатки и ослабления его взаимодействия с пограничным слоем на спинке лопатки, что сопровождается уменьшением потерь энергии газа. Винглет со стороны корытца рабочей лопатки при-

водит к увеличению КПД ступени за счёт существенного снижения утечки через радиальный зазор при уменьшении скорости утечки в результате

снижения градиента давления и увеличения пути торможения в зазоре.

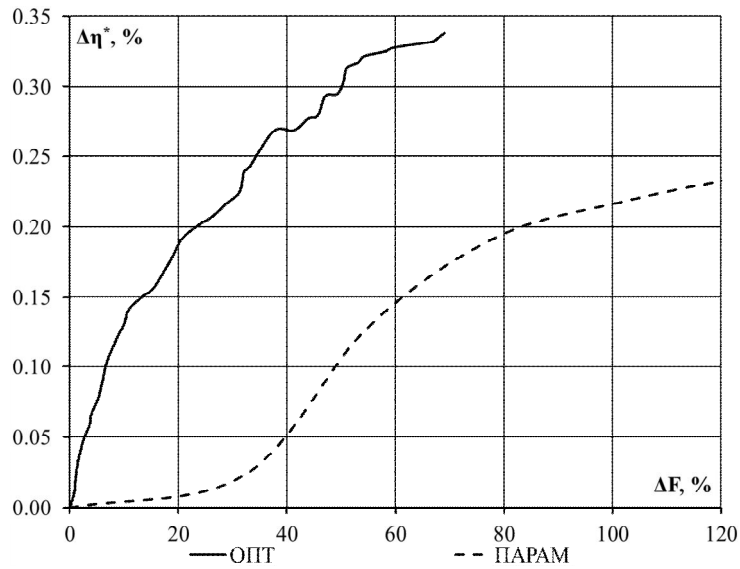


Рис. 4. Сравнение эффективности винглетов с равномерным (ПАРАМ) и неравномерным утолщением (ОПТ)

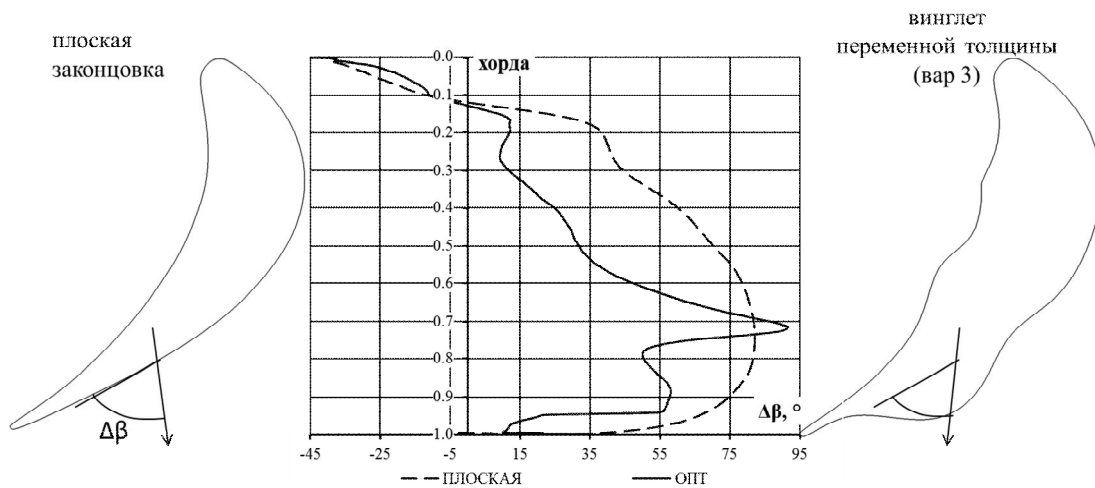


Рис. 5. Сравнение структур течения на законцовке РК

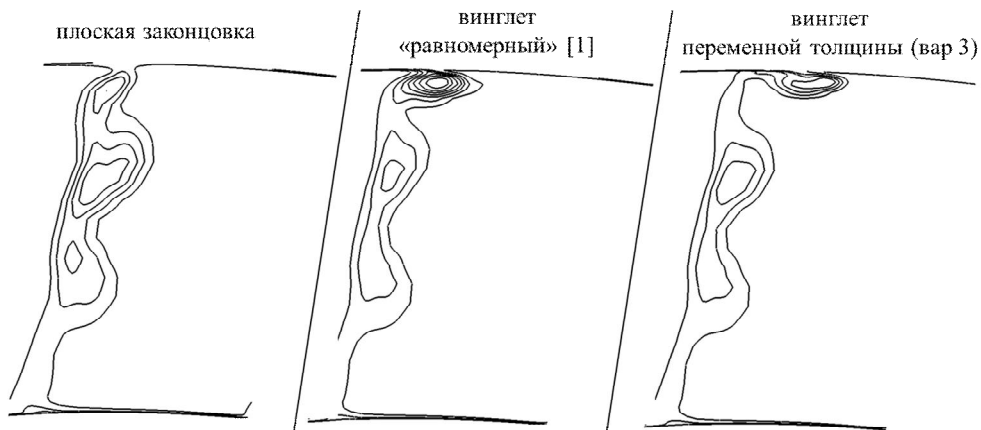


Рис. 6. Сравнение неравномерности потока на выходе из рабочего колеса

По результатам проведённого оптимизационного исследования можно сделать следующие выводы:

- разработана параметрическая модель рабочей лопатки с винглетом переменной толщины;

- параметрическая модель позволяет получать решения, в полной мере объясняемые с помощью современных представлений о структуре и свойствах течения газа в межлопаточном канале рабочего колеса турбинной ступени;

- отработана газодинамическая оптимизация в IOSO на основании многокритериального метода не прямой оптимизации;

- в результате применения винглета ожидаемое увеличение КПД турбинной ступени может составить до 0,2 – 0,25 %;

- винглет с переменным утолщением является существенно эффективнее «равномерного» винглета; одинаковое повышение КПД $\Delta\eta^*$ достигается при значительно меньшем приросте площади законцовки как следствие массы. Наблюдался выигрыш по площади законцовки до трех раз;

- для дальнейшего совершенствования разработанной рабочей лопатки с винглетом необходимо: во-первых, разработать и оптимизировать геометрию канавки (реборды) на торцевой части лопатки для повышения качества уплотнения радиального зазора и облегчения периферии лопатки с винглетом; во-вторых, сделать анализ напряжённо-деформированного состояния лопатки с винглетом.