Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 3 (2012 5) 245-257
~ ~ ~

УДК 621.624.533

Сравнение аэродинамических характеристик лопаточных венцов с различной формой оси лопатки

С.В. Караджи, Р.З. Тумашев*
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Россия 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5 [1]

Received 13.08.2012, received in revised form 20.08.2012, accepted 27.08.2012

Экспериментально и расчетно изучено влияние формы оси лопатки на интегральные аэродинамические характеристики рабочего колеса осевого компрессора. Проведены измерения и сопоставление полей параметров потока для лопаточных венцов с различной осью лопатки. Даны рекомендации по профилированию лопаточных венцов с искривленной осью лопатки.

Ключевые слова: осевое рабочее колесо, серповидная лопатка, экспериментальное исследование, исследование расчетными методами.

Введение

В настоящее время большинство инженерных методик расчета осевых вентиляторных ступеней на заданные расход и давление ведутся по цилиндрическим сечениям. Рассматриваются двумерные бесконечные решетки профилей и определяются потребные кривизны и углы установки лопаток на соответствующем радиусе лопатки. Далее профили совмещаются по линии, соединяющей центры масс каждого сечения, что связано с лучшими прочностными характеристиками. Данная методика расчета практически не учитывает возможную трехмерность течения в межлопаточном канале осевого лопаточного венца. Даже при профилировании лопаточных венцов по закону постоянства циркуляции, которое соответствует радиальному равновесию потока в рабочем колесе, данное равновесие потока выполняется только на расчетном режиме, а на всех остальных режимах присутствует движение воздуха в радиальном направлении. Ввиду этого интересной является задача определения влияния формы оси лопатки на аэродинамические характеристики осевых лопаточных машин и возможности дальнейшего учета возникающей трехмерности течения в методике профилирования.

Различные исследования по влиянию формы оси лопаток рабочего колеса или спрямляющего аппарата осевой лопаточной машины на аэродинамические и акустические характеристики проводились ещё в середине XX века. По результатам этих работ выяснилось, что при применении серповидных (будем называть искривление оси лопатки по вращению в плоскости

* Corresponding author E-mail address: svkaradji@gmail.com
[1] © Siberian Federal University. All rights reserved

вращения серповидностью) лопаток можно снизить суммарный шум лопаточного венца примерно на 1-6 дБ. Такой эффект обусловлен снижением шума на дискретных составляющих, связанных с шумом вращения, ввиду того что форма лопатки становится пространственной и присутствует разность фаз источников шума нагрузки и вытеснения [1].

Была поставлена задача более подробно изучить, каким образом и за счет чего меняется аэродинамическая характеристика при изменении формы оси лопатки. Получены интегральные характеристики, а также определены поля скоростей с помощью пневмометрических насадков на выходе из обычного рабочего колеса и рабочего колеса, имеющего искривленную ось совмещения лопатки. По полученным интегральным данным и полям скоростей была проведена верификация расчетной модели, которая дала некоторое объяснение эффектам, возникающим при изменении формы оси лопатки.

Экспериментальные модели

Для изучения влияния оси совмещения профилей на аэродинамические свойства осевой лопаточной машины было спрофилировано осевое рабочее колесо по методике, описанной в [2, 3]. Профилирование лопаточного венца производилось по методу дискретных вихрей [4]. Колесо было спрофилировано на постоянство циркуляции вдоль радиуса, что было обусловлено тем, что такой закон профилирования приводит к наименьшим потерям, связанным с выходной скоростью. Кроме того, при таком законе профилирования распределение работы подводимой вдоль радиуса лопатки должно быть одинаковым и, следовательно, амплитуды источников шума нагрузки тоже должны быть одинаковыми. Это приведет к тому, что если пространственная форма лопатки будет занимать точно один период (как показано на рис. 2), то разбег фаз источников звука должен составить 2π, что при одинаковых амплитудах источников должно привести к сильному снижению шума вращения. Сама же форма средней линии, по-видимому, не так важна с точки зрения акустики и выбиралась из соображений аэродинамики. С целью сохранения постоянства циркуляции вдоль радиуса в качестве формы оси лопатки была выбрана логарифмическая спираль ($r = A \cdot e^{B \cdot \theta}$). Угол между касательной к логарифмической спирали и радиусом в каждой точке сохраняется постоянным и равным $\gamma = arcctg(B)$. При этом сила, действующая со стороны лопатки на поток, направлена в каждой точке под одним и тем же углом к радиусу (рис. 1).

Таким образом, были спроектированы два рабочих колеса (РК), имеющие идентичные решетки профилей в цилиндрических сечениях по высоте и отличающиеся только осью совмещения профилей (рис. 2). Расчетные параметры характерны для ступени осевого компрессора.

Коэффициент теоретического напора $\overline{H}_T = \frac{H_T}{\rho u^2} = 0{,}23$, коэффициент расхода $\bar{c}_a = \frac{Q}{Fu(1-\nu^2)} = 0{,}5$ и втулочное соотношение $\nu = \frac{d_{\text{вт}}}{D} = 0{,}5$. Здесь H_T – теоретическое давление рабочего колеса, $\rho = 1{,}21$ кг/м^3 – плотность воздуха, $u = \frac{\pi D n}{60}$ – окружная скорость концов лопаток, D – диаметр модели лопаточной системы, n – частота вращения, Q – объемный расход, $F = \frac{\pi D^2}{4}$ – площадь, $d_{\text{вт}}$ – диаметр втулки.

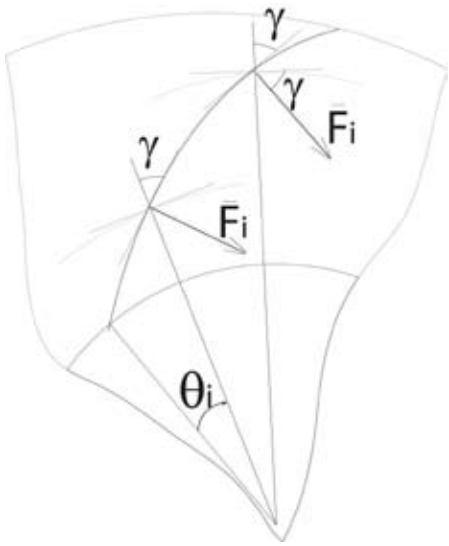

Рис. 1. Форма оси лопатки и направления сил, действующих со стороны лопатки на поток

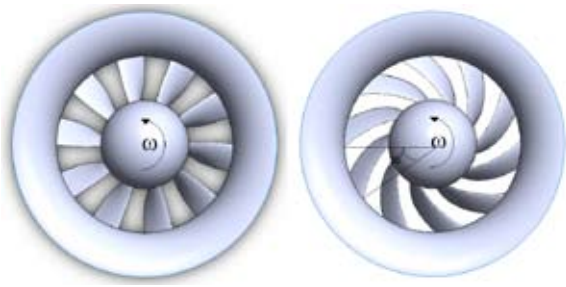

Рис. 2. Лопаточный венец с радиальной и серповидной осью лопатки

Рабочее колесо с выбранными параметрами имеет широкий диапазон применения и может использоваться как в ступени стационарного компрессора, так и в дополнительных системах других типов компрессоров. Также её можно применять и в качестве движителя для дозвуковых летательных аппаратов.

Интегральные аэродинамические характеристики

Испытания проводились на испытательном стенде типа «камера всасывания» (рис. 3). На входе установлен тарированный расходомерный коллектор, далее дроссель, после которого установлен вентилятор наддува, на входе в исследуемый лопаточный венец находится успокоительная камера, на входе которой стоят сетки и хонейкомб для выравнивания потока. Диаметр испытуемой модели составляет $D = 0{,}7$ м, а частота вращения $n = 750$ об/мин. Погрешности определения аэродинамических параметров при таких низких окружных скоростях можно определять по ГОСТ 10921-90 «Аэродинамические испытания осевых и центробежных вентиляторов». При этом средние квадратические относительные погрешности при измерениях составляют: для объемного расхода $\sigma_Q = 0{,}99$ %; для полного давления $\sigma_{pv} = 0{,}86$ %; для потре-

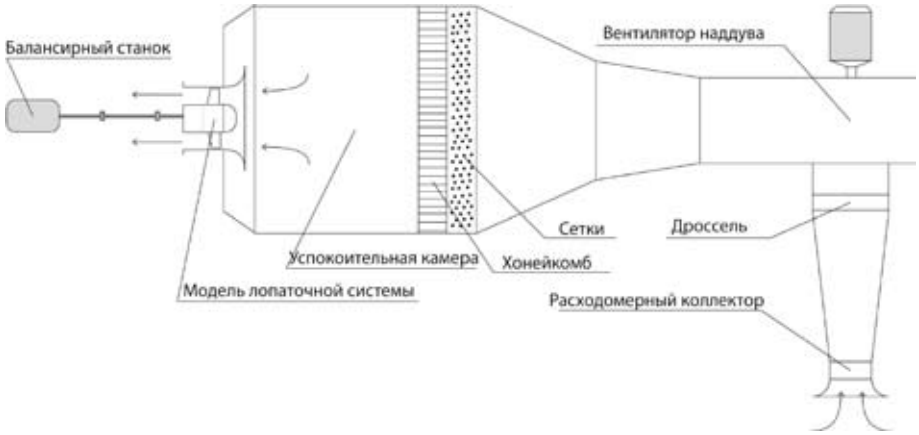

Рис. 3. Схема испытательного стенда

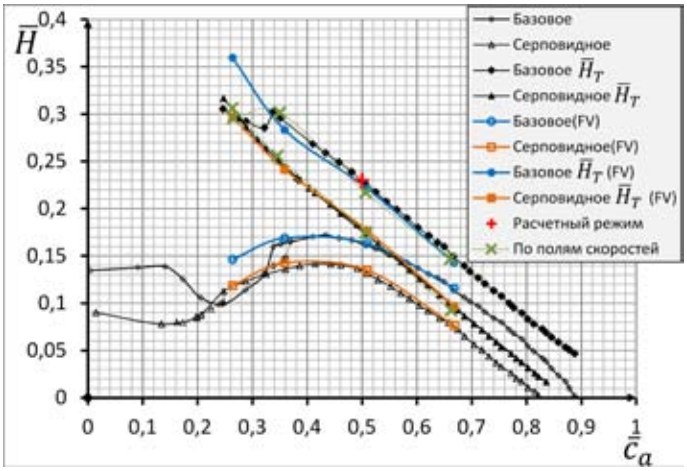

Рис. 4. Зависимость коэффициента теоретического давления и коэффициента полного давления от коэффициента расхода

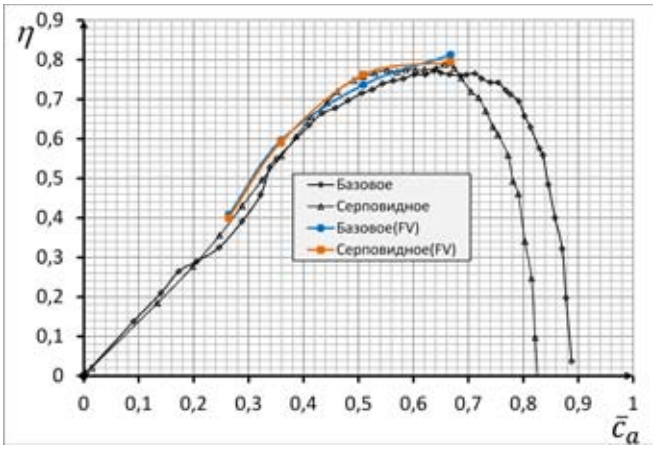

Рис. 5. Зависимость КПД от коэффициента расхода

бляемой мощности N при измерении крутящего момента M и частоты вращения $\sigma_N = 0{,}54\ \%$; для определения полного КПД $\sigma_\eta = 1{,}5\ \%$.

Используя данный аэродинамический стенд, были получены интегральные аэродинамические характеристики базового и исследуемого лопаточного венца (рис. 4, 5). КПД определялся по формуле $\eta = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_T}$, где $\bar{H}_T = \frac{N}{Q\rho u^2}$ – коэффициент теоретического давления.

Как видно из графиков, при использовании серповидных лопаток снижается максимум давления лопаточного венца. Более того, прямая коэффициента теоретического давления проходит параллельно, но ниже расчетной. Оказалось, что при уменьшении угла установки лопаток с радиальной осью совмещения на 3° коэффициент теоретического давления совпадает с коэффициентом теоретического давления серповидных лопаток.

Эти результаты говорят о том, что при профилировании колеса с такого рода серповидностью лопаток, возможно, нужно делать необходимые поправки на расчетное теоретическое давление или на расчетные углы атаки, так как для таких лопаток углы отставания, по-видимому, становятся больше.

Измерения полей скоростей

Измерения полей скоростей производились цилиндрическими насадками (рис. 6) и пятитрубчатыми насадками (рис. 7). Описание такого типа насадков можно найти в работах [5, 6].

Измерения производились в неподвижной системе координат, вдоль радиуса, на расстоянии 5 мм от среза исследуемого рабочего колеса (рис. 8).

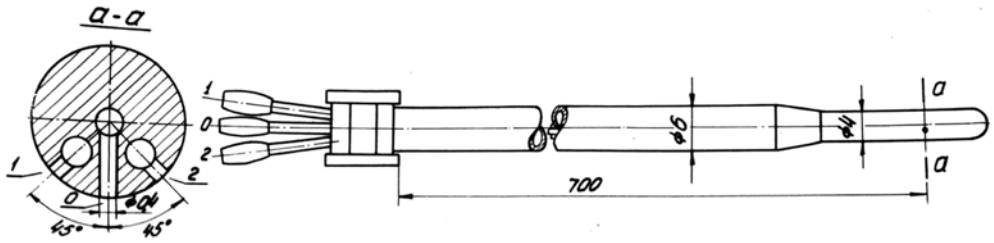

Рис. 6. Эскиз цилиндрического насадка

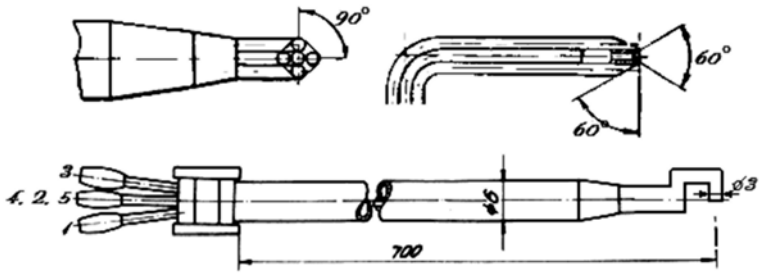

Рис. 7. Эскиз пятитрубчатого насадка

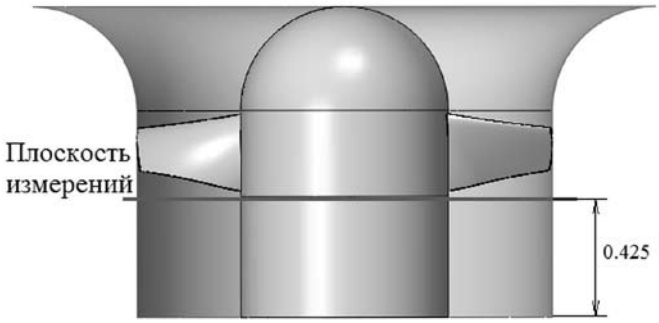

Рис. 8. Измерительная плоскость

Цилиндрический насадок позволяет измерять две компоненты скорости и полное давление. В общем случае присутствует ещё и третья компонента скорости, это будет вносить погрешности в измерения, полученные данным типом насадка. В книгах [5, 6] приведены экспериментально полученные коэффициенты, позволяющие частично учесть ошибки измерений в том случае, если известен угол скоса потока.

Так как при использовании лопаток с измененной осью ожидалось возникновение радиальной компоненты скорости, то для того, чтобы избежать погрешностей, связанных со скосом потока, поля скоростей и полных давлений были также промерены пятитрубчатым насадком. Пневмометрический насадок данного типа позволяет измерять все три компоненты скорости, но имеет более сложную методику тарировки.

Оба насадка были предварительно протарированы в аэродинамической трубе. Измерения производились нулевым методом.

Следует помнить, что кроме погрешностей, связанных с наличием радиальной составляющей скорости, возникают погрешности из-за неравномерности поля скоростей за рабочим колесом. При измерении в неподвижной системе координат вектор направления скорости постоянно меняется из-за того, что насадок попадает в след от проходящей мимо него лопатки. Исследования в данной области проводились в [7] и показали, что основная погрешность возникает в измерении направления скорости и при градиенте скорости $\frac{\partial v}{\partial y} = \pm 100\ \frac{1}{\text{с}}$, погрешность в измерении достигает всего лишь $\delta = \pm 0{,}5^{\text{o}}$. Этими погрешностями можно пренебречь в отношении определения скорости, но они могут привести к сильным расхождениям в показаниях полного давления. Поэтому распределения полных давлений и КПД по радиусу здесь не рассматриваются.

Для проверки точности измерений дополнительно была проведена проверка по интегральным характеристикам (мощность и расход), полученным при определении режима, на котором проводились измерения полей скоростей:

$$\bar{c}_a = \frac{2}{1-\nu^2}\int_{\nu}^{1} \bar{c}_{2a}(\bar{r})\bar{r}d\bar{r},$$

где $\bar{c}_{2a}(\bar{r}) = \frac{c_{2a}(\bar{r})}{u}$ – коэффициент осевой составляющей скорости, $\bar{r} = \frac{2r}{D}$ – относительный радиус;

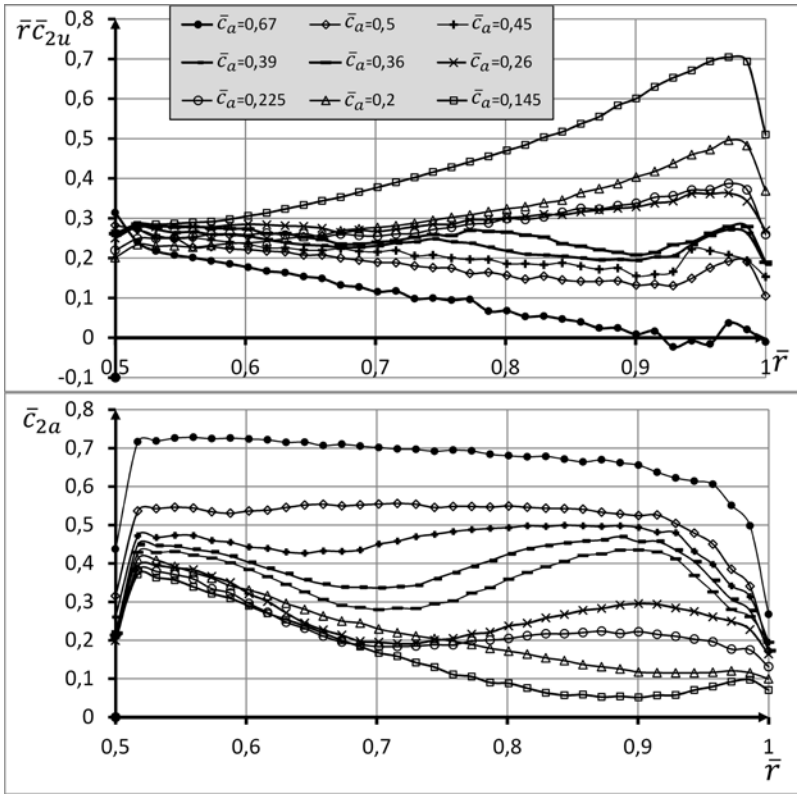

Рис. 9. Распределение циркуляции и коэффициента осевой составляющей скорости по радиусу на различных режимах для серповидного рабочего колеса

$$\bar{H}_T = \frac{\int_v^1 \bar{c}_{2a}(\bar{r})\bar{c}_{2u}(\bar{r})\bar{r}^2 d\bar{r}}{\int_v^1 \bar{c}_{2a}(\bar{r})\bar{r} d\bar{r}},$$

где $\bar{c}_{2u}(\bar{r}) = \frac{c_{2u}(\bar{r})}{u}$ – коэффициент окружной составляющей скорости.

Как показано на рис. 4, теоретическое давление, полученное по полям скоростей, хорошо ложится на интегральные характеристики.

Вторая особенность полученной аэродинамической характеристики экспериментального колеса с серповидными лопатками заключается в бóльшем запасе до срыва и слабом падении давления при переходе к срывному режиму. Это, возможно, связано с постоянно находящимся отрывом в периферийных сечениях колеса, где серповидность такого рода не является благоприятной. В этой области усиливается «скребковый эффект» и перетекания. Несмотря на это, как видно из рис. 4, КПД экспериментального лопаточного венца не снижается. Для исследования этих явлений были получены поля скоростей на 7 режимах с помощью цилиндрического насадка. В частности, на верхней и нижней ветви гистерезиса (рис. 9).

На рис. 10 показано сравнение полей скоростей, измеренных различными типами насадков, на выходе из базового и серповидного рабочих колес вдоль радиуса. Данные поля были получены с помощью цилиндрического насадка (при таких измерениях погрешности могут достигать 5-10 %) и пятитрубчатого насадка, который имеет меньшую погрешность, так как измеряет третью компоненту скорости. При уменьшении расхода (при удалении от расчетного

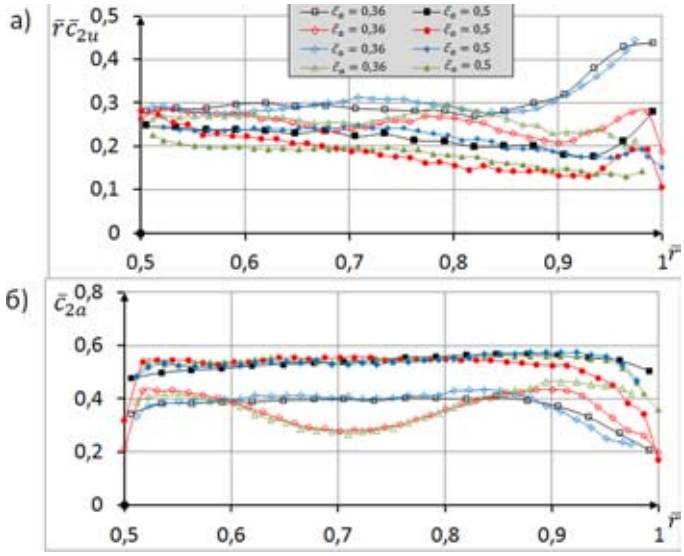

Рис. 10. Распределение циркуляции (а) и коэффициента осевой скорости (б) вдоль радиуса, при различных расходах: ■(цилиндрический), ♦(пятитрубчатый) – РК с радиальной осью лопаток; ●(цилиндрический), ▲(пятитрубчатый) – РК с серповидной осью лопаток

режима) ухудшается работа средних сечений серповидного рабочего колеса (рис. 10). А у базового рабочего колеса ухудшается работа периферии.

Также видно, что цилиндрический насадок, так же как и пятитрубчатый, отражает картину течения, но, как и ожидалось, имеет расхождения в измерениях относительно пятитрубчатого на 5-10 %.

Расчетные методы

Необходимость изучить характер течения в лопаточных венцах, рабочие лопатки которых имеют различную ось, потребовала более детального изучения течения в межлопаточном канале. С этой целью было решено применить расчетные методы. Результаты расчетов верифицировались по интегральным характеристикам и полученным пятитрубчатым насадком полям скоростей потока на выходе из рабочего колеса со стандартными лопатками и лопатками с измененной осью совмещения. Был рассмотрен российский программный пакет численного расчета течения в турбомашинах путем решения осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса– Flowvision 2.5(FV) [8].

На входе в расчетную область находился небольшой входной участок, имитирующий коллектор и нарастание пограничного слоя, присутствовавшее в эксперименте. Рассчитывались только два канала лопаточного венца в связи с ограниченными вычислительными мощностями и для сокращения времени счета. Далее цилиндрическая часть, соответствующая той, что присутствовала в эксперименте, и затопленное пространство (рис. 11).

При расчете на Flowvision сетка была прямоугольной. При этом оптимальное количество ячеек в расчетной области оказалось порядка 10^6 (рис. 12), при дальнейшем увеличении количества ячеек решение не изменялось.

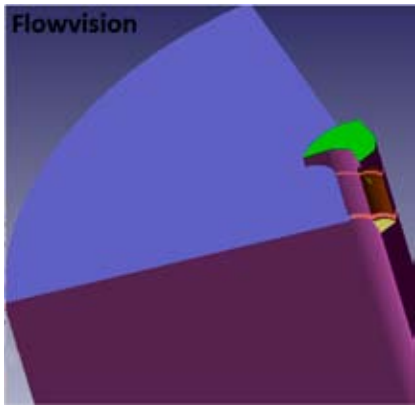

Рис. 11. Геометрия расчетной области

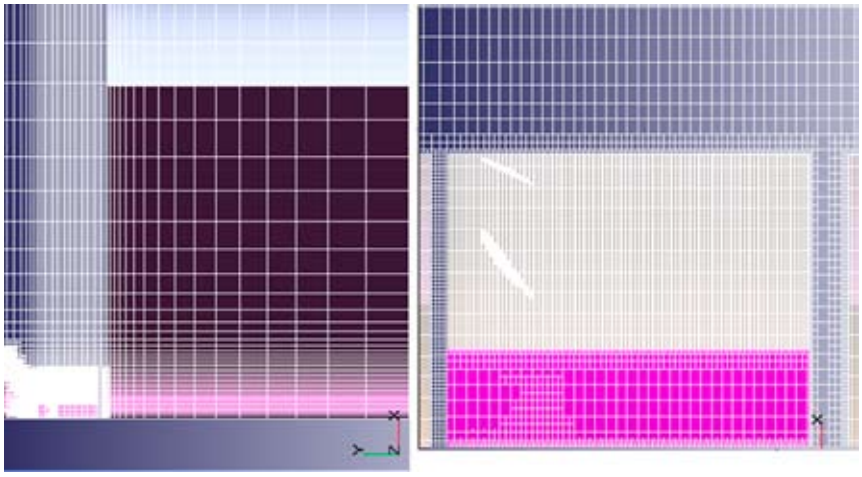

Рис. 12. Вид расчетной сетки

Модель турбулентности SST привела к самому хорошему совпадению расчетных интегральных характеристик с экспериментальными (рис. 4, 5, 13, 14). Решалась стационарная задача, расчетная характеристика была получена методом установления. Шаг по времени выбирался из количества ячеек, размеров области и характерных скоростей так, чтобы число Куранта для явного метода расчета равнялось единице.

На входе в расчетную область задавалась нормальная скорость, соответствующая определенной точке по коэффициенту расхода лопаточной системы. На выходе задавалось нулевое статическое давление и свободный выход. В результате расчета при каждом заданном расходе была получена разность давлений, создаваемая лопаточным венцом.

Сравнение полей скоростей и интегральных характеристик показало, что расчет на программном комплексе Flowvision, модель SST, хорошо описывает поля скоростей, полученные в эксперименте. Исключением является режим $\bar{c}_a = 0{,}25$, совпадение на котором хуже, что, по-видимому, связанно с тем, что на этих режимах возникает осевая асимметрия, что требует расчета всего лопаточного венца, а не двух межлопаточных каналов.

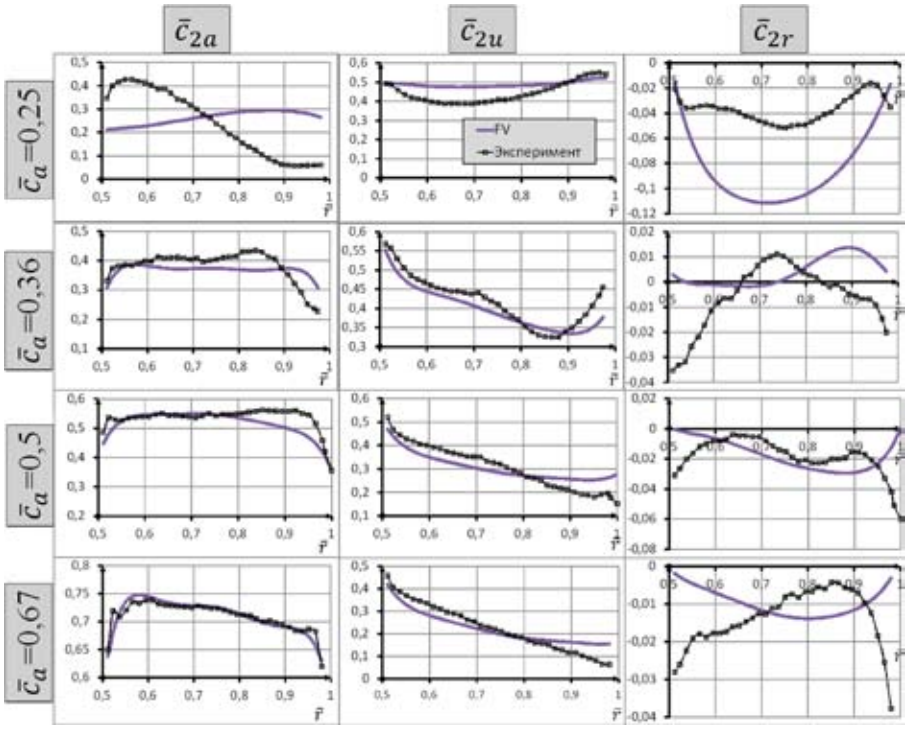

Рис. 13. Сравнение экспериментальных и расчетных компонент скорости на выходе из базового рабочего колеса на четырех режимах по расходу

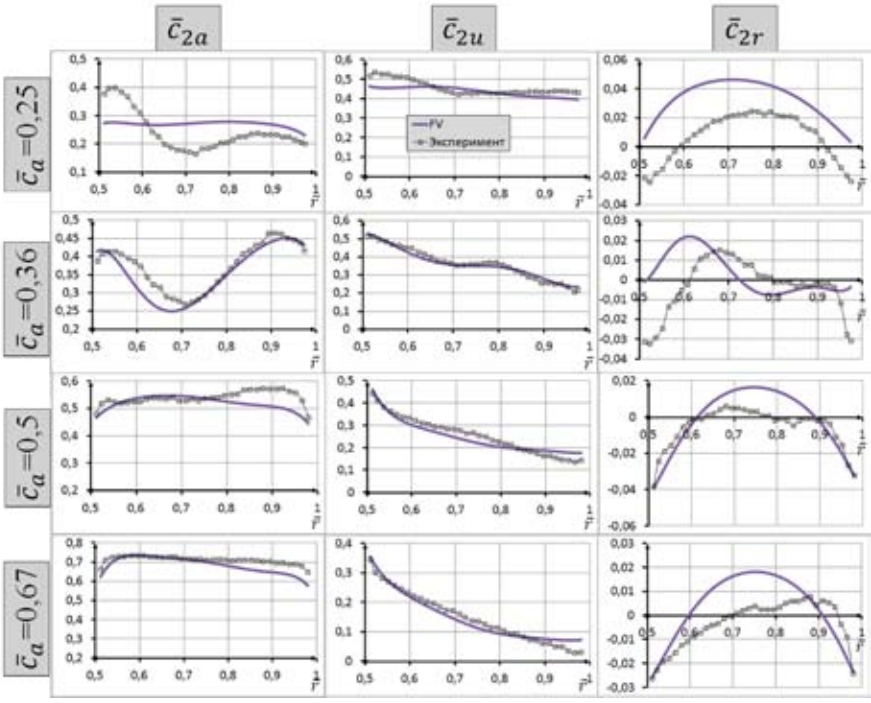

Рис. 14. Сравнение экспериментальных и расчетных компонент скорости на выходе из серповидного рабочего колеса на четырех режимах по расходу

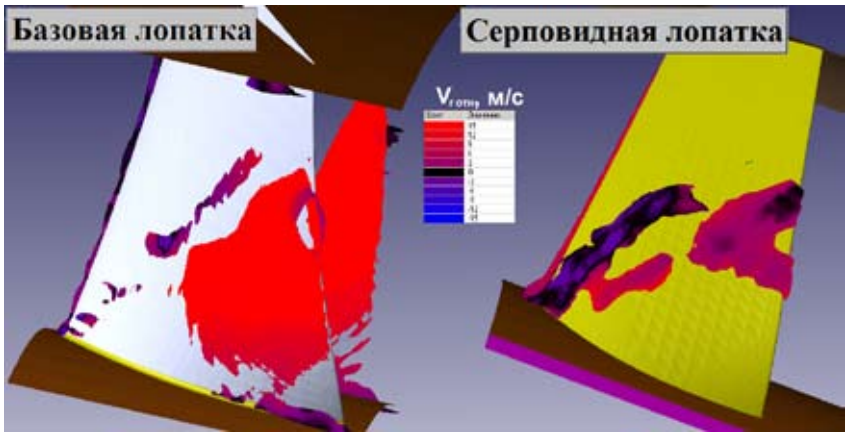

Рис. 15. Сравнение изоповерхностей нулевой осевой относительной скорости (место отрыва потока) на режиме $\bar{c}_a = 0{,}36$

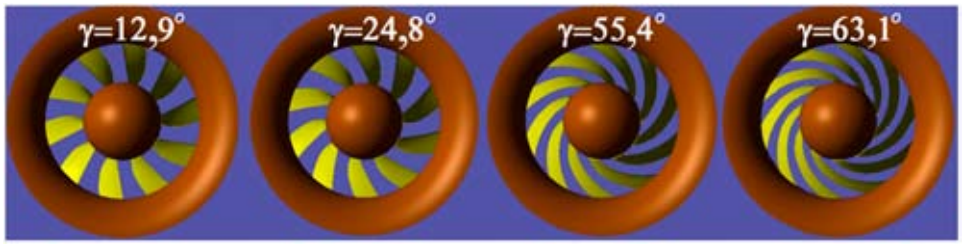

Рис. 16. Виды рабочих колес с различными углами навала

Измерения параметров полей потока показали, что характер перехода к срывным режимам у двух исследуемых колес сильно отличается. Об этом свидетельствует провал осевой компоненты абсолютной скорости в середине лопатки на предсрывных режимах для колеса с серповидными лопатками.

Для более детального исследования образования отрыва были построены изоповерхности нулевой осевой компоненты относительной скорости (рис. 15). Как видно, в колесе, лопатки которого имеют радиальную ось, отрыв присутствует практически по всей длине лопатки. В серповидных лопатках присутствует снос отрыва, возникающего у втулки, который впоследствии срывается в середине лопатки, что и соответствует провалу осевой компоненты абсолютной скорости в полях скоростей.

По причине снижения теоретического давления на расчетном режиме для серповидных лопаток необходимо было определить зависимость теоретического давления, создаваемого лопаточной системой от угла навала. С этой целью было произведено численное моделирование течения на расчетном режиме в лопаточных венцах, имеющих различный угол γ. На рис. 16 показан общий вид моделей рабочих колес. Угол γ равнялся 12,9º, 24,8º, 55,4º и 63,1º.

С учетом того, что лопатка с радиальной осью совмещения ($\gamma = 0^{\circ}$) и с углом $\gamma = 43{,}4^{\circ}$ были исследованы экспериментально и расчетными методами, а также если предположить, что в предельном случае при угле навала $\gamma = 90^{\circ}$ лопаточный венец не должен создавать давления,

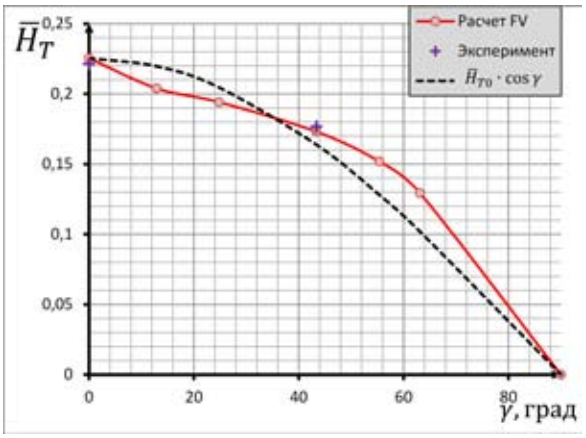

Рис. 17. Зависимость теоретического давления лопаточной системы от угла навала

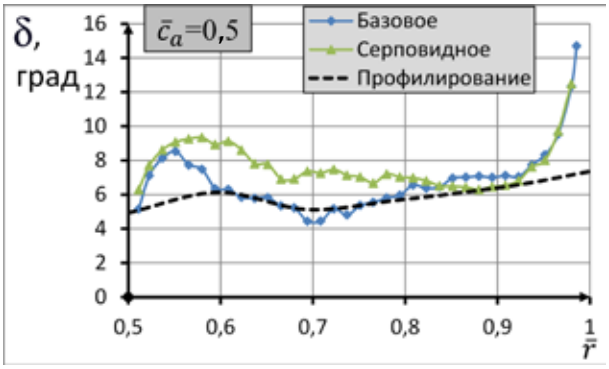

Рис. 18. Угол отставания на расчетном режиме

можно получить зависимость теоретического давления, создаваемого рабочим колесом от угла навала лопатки по направлению вращения (рис. 17).

На рис. 17 крестами отмечены точки, полученные из эксперимента, а кругами – с помощью численного моделирования. Исходя из формы полученной кривой можно дать рекомендации по способу учета снижения давления за счет серповидности лопаток. Зависимость на рис. 17 можно аппроксимировать кривой $\overline{H}_T = \overline{H}_{T0} \cdot \cos\gamma$ со степенью достоверности $R^2 = 0{,}9629$, где $\overline{H}_{T0}$ – теоретическое давление, создаваемое при угле навала $\gamma = 0$. Таким образом, при проектировании лопаточных венцов с серповидными лопатками с осью, выполненной по логарифмической спирали, загнутой по направлению в плоскости вращения, давление, создаваемое такой лопаточной системой, будет в $\cos\gamma$ меньше, чем при использовании базовой радиальной оси совмещения. Достигнутый результат соответствует аналитической зависимости для угла выхода потока от угла навала, полученной в [9]: $ctg\beta_2' = ctg\beta_2 \cos\gamma$.

Выводы

Полученные экспериментальные и расчетные данные показали, что падание давления на расчетном режиме действительно происходит из-за увеличения углов отставания (рис. 18). Та-

ким образом, серповидность можно учитывать просто как завышенную поправку на вязкость. Хотя причины такого изменения углов отставания, скорее всего, более глубокие и связаны с радиальной составляющей силы, действующей со стороны серповидной лопатки на поток. Исходя из численных расчетов и экспериментов было получено, что теоретическое давление падает как $\cos\gamma$ в зависимости от угла навала γ (рис. 17).

Эффект затягивания срыва, как оказалось, связан с отрывом на входе в рабочее колесо у втулки и сносом этого отрыва вдоль серповидной лопатки, в то время как в рабочем колесе с базовой лопаткой на этих режимах уже возникает срыв по всей длине лопатки (рис. 15).

Список литературы

[1] *Harvey H. Habbard*, Aeroacoustics of flight vehicles, Volume 1, Noise sources, NASA Reference publication 1258. Vol. 1. WRDC Technical report 90-3052, 1991. 592 p.

[2] *Брусиловский И. В.* Аэродинамический расчет осевых вентиляторов. М.: Машиностроение, 1986. 288 с.

[3] *Довжик С. А.* // Труды ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского. Вып. 1099. 1968. 279 с.

[4] *Белоцерковский С. М., Ништ М. И.* Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 352 с.

[5] *Пешехонов Н. Ф.* Приборы для измерения давления, температуры и направления потока в компрессорах. М.: Оборонгиз, 1962. 183 с.

[6] *Петунин А. Н.* Методы и техника измерения параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). М.: Машиностроение, 1972. 329 с.

[7] *Колесников А. В., Носов А. Я.* Промышленная аэродинамика. М.: Оборонгиз, 1962. № 24. С. 134-141.

[8] *Караджи С. В.* // Инженерные системы: Труды Междунар. НПК, 2010. С. 1620.

[9] *Сироткин Я. А.* Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин. М.: Машиностроение, 1972. 448 с.

Aerodynamics of Axial Rotors with Different Axis of Blade Alignment

Sergey V. Karadzhi and Ramil Z. Tumashev
Moscow State Bauman University
5 2-nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005 Russia

Experimentally and numerically investigated the influence of the line of blade alignment on integral aerodynamic characteristics of axial rotor. Velocities on the exit of rotor were measured and compared for rotors with different axis of blade alignment. Recommendations on development of rotors with forward swept blades were made.

Keywords: axial rotor, forward-swept blade, experimental investigation, numeric investigation.