

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАКЛОНА СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТУПЕНИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

© 2008 О. В. Батуринов, В. Н. Матвеев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Излагаются результаты расчетного исследования и обосновываются изменения структуры потока и потерь в лопаточных венцах трансзвуковой турбинной ступени при тангенциальном наклоне сопловых лопаток. Предлагаются рекомендации по выбору формы наклоненных лопаток соплового аппарата.

Сопловая лопатка, турбина, эффективность, наклон, сила, периферия, спинка, корытце, давление

Одним из перспективных путей повышения газодинамической эффективности ступени осевой турбины является рациональное распределение степени реактивности по высоте лопатки. В большинстве турбин при использовании традиционных законов закрутки возникают неблагоприятные условия течения в корневой области из-за сверхзвуковых скоростей на выходе из соплового аппарата (СА) и поперечных подсосов из полостей охлаждающего воздуха. В обычных ступенях заметное снижение корневой степени реактивности ρ_{BT} заставляет при проектировании выбирать повышенные реактивности на среднем радиусе. Последнее приводит к большой периферийной степени реактивности, что является причиной значительных утечек в радиальных зазорах (РЗ).

В качестве основного способа снижения радиального градиента давлений в настоящее время часто используется тангенциальный наклон лопаток СА. Опыт применения тангенциально наклоненных лопаток СА в изделиях, спроектированных в СНТК им Н.Д. Кузнецова, показывает, что наклон лопаток не усложняет конструкцию и технологию изготовления СА. Более того, обеспечиваемое в ступени с тангенциальным наклоном СА меньшее изменение величины β_1 по радиусу упрощает конструкцию охлаждаемой рабочей лопатки. К тому же применение тангенциально наклоненных сопловых лопаток приводит к снижению переменных напряжений в рабочих лопатках [1].

Однако далеко не любая форма саблевидных лопаток обеспечивает снижение потерь в ступени турбины [2]. Поэтому требуемая пространственная форма лопатки может быть получена в результате анализа результатов серии расчетов вязкого трехмерного течения газа в ступени при различных конфигурациях пера лопатки. Кроме того, существует необходимость исследования влияния наклона лопаток СА на рабочий процесс турбины с учетом течения газа в последующих венцах. Дело в том, что перераспределение степени реактивности в ступени может привести к возникновению отрывов потока в периферийных сечениях рабочего колеса, особенно в трансзвуковых ступенях [3].

Исследование влияния тангенциального наклона сопловых лопаток на газодинамическую эффективность ступени осевой турбины проводилось с помощью программы FlowEr [4]. В качестве объекта исследования была выбрана одноступенчатая трансзвуковая ТВД двигателя НК-93. Всего было исследовано 9 вариантов наклона сопловой лопатки: исходный вариант; два варианта простого наклона (перо СА наклонялось целиком в сторону спинки или корытца), также именуемого в технической литературе навалом; 6 вариантов сложного наклона (рис. 1), который иногда называют саблевидностью. В процессе исследования менялась только геометрия СА. Рабочее колесо (РК) оставалось неизменным.

При наклоне лопатки происходит изменение сил взаимодействия потока и пера, что оказывает существенное влияние на рас-

пределение давления в межлопаточном канале и влечет за собой изменение параметров потока во всей ступени и всех составляющих потерь. Как показал анализ

полученных данных при наклоне лопатки наиболее существенно будут меняться вторичные и волновые потери в СА.

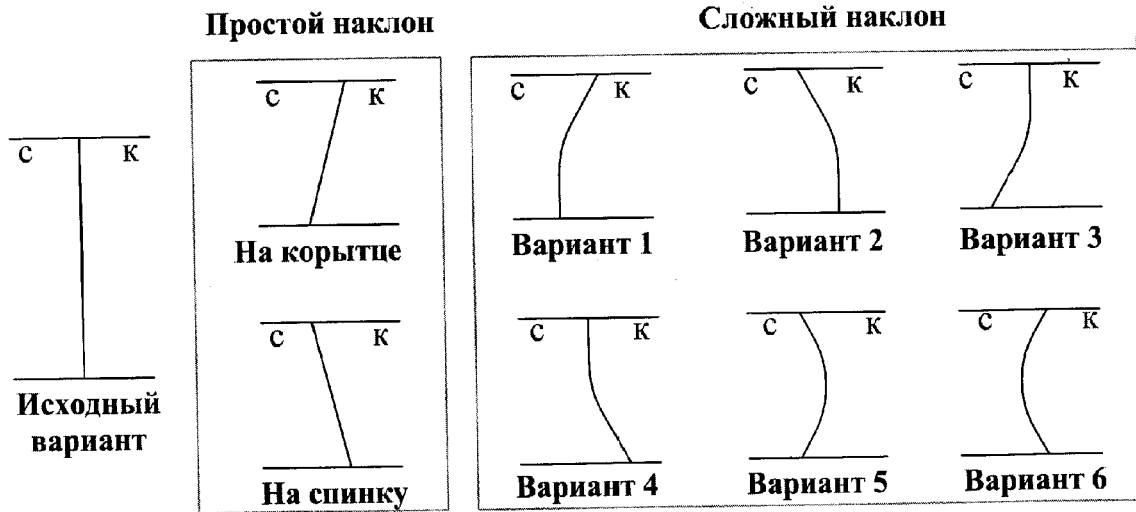


Рис. 1. Принципиальные схемы исследованных вариантов сложного наклона:
с – спинка, к – корытце

При наклоне лопатки у силы, с которой она воздействует на поток, появляется радиальная составляющая (рис. 2). Поскольку давление у корытца больше, чем у спинки, то радиальная составляющая силы воздействия лопатки на поток вблизи корытца будет больше, чем у спинки $F_{КОР}^R > F_{СП}^R$. Из-за этого интенсивность изменения давления у корытца оказывается больше, чем у спинки. В результате среднее по ширине межлопаточного канала давление на выходе из СА качественно будет меняться так же, как давление у корытца.

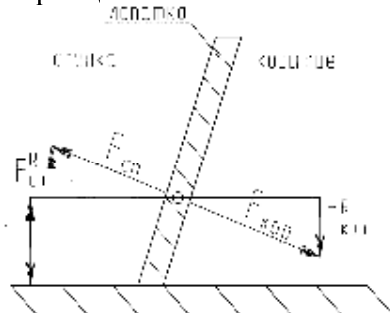


Рис. 2. Схема сил, действующих на поток со стороны лопатки во втулочном сечении

При простом наклоне сопловых лопаток в сторону корытца в области втулки давление у корытца увеличивается, а у спинки уменьшается. В результате перепад давления между спинкой и корытцем растет

при увеличении во втулочных сечениях среднего по шагу решетки давления на выходе из СА. Увеличение перепада давления между спинкой и корытцем интенсифицирует втулочный вихрь, но рост среднего давления за СА приводит к уменьшению скорости трансзвукового потока и, следовательно, волновых потерь. Уменьшение последних и обуславливает снижение суммарных потерь у втулки при наклоне лопаток СА на корытце (рис. 3).

У периферии картина течения газа при простом наклоне сопловых лопаток на корытце меняется следующим образом. Здесь перепад давления между корытцем и спинкой уменьшается на фоне снижения среднего по шагу решетки давления на выходе из СА. Уменьшение перепада давления хотя и приводит к снижению интенсивности вторичного вихря у периферии, однако из-за уменьшения среднего давления и роста скорости трансзвукового потока увеличиваются волновые потери. Они оказывают преобладающее влияние на общий уровень потерь. Поэтому коэффициент потерь в периферийной области возрастает (рис. 3). Интересно отметить, что при наклоне сопловых лопаток на корытце периферийный вихрь радиальной составляющей силы $F_{СП}^R$ (рис. 2) прижимается ближе к верхней концевой поверхности (рис. 3).

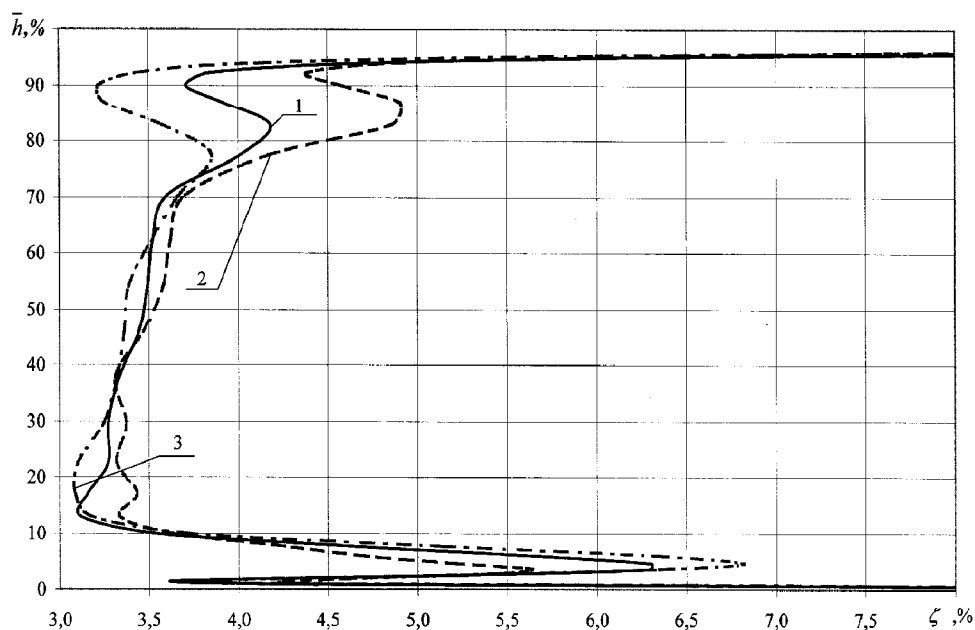


Рис. 3. Распределение коэффициента потерь в СА $\xi_{пр}$ по высоте проточной части: 1 – исходная лопатка (сплошная линия); 2 – лопатка с наклоном на корытце (пунктир); 3 – лопатка с наклоном на спинку (штрих - пунктир)

В общей сложности тангенциальный наклон сопловых ЛВ вызывает изменение потерь не более, чем на 0,1%. Вместе с тем, наклон сопловых лопаток оказывает влияние на распределение статического давления p_1 на выходе из СА и степени реактивности p по высоте проточной части (рис. 4). Так, при наклоне в сторону корытца на 10° степень реактивности у втулки $p_{вт}$ растет на 2%, а у периферии $p_{пер}$ уменьшается на 4%.

Снижение перепада давления на РК в периферийном сечении приводит к уменьшению потерь на утечку через радиальный зазор. В частности, полученное уменьшение степени реактивности на периферии $p_{пер}$ на 4% обеспечивает снижение потерь на утечку через радиальный зазор, обуславливающий повышение кпд рассматриваемой ступени на 0,16% (табл. 1).

Таблица 1 - Значения основных газодинамических параметров исследуемой ступени турбины при различных вариантах тангенциального наклона СА

Параметр \ Направление наклона	без на- клона	На спинку 10°	На корытце 10°	Вариант 3	Вариант 5
$dp_{СА}^* / p_0^*, \%$	2,04	2,03	2,15	1,91	1,98
$dp_{wPK}^* / p_{w1}^*, \%$	5,04	4,9	4,95	4,89	4,81
η_T^* (без учета утечек)	0,9247	0,9261	0,9250	0,9274	0,9264
$G_{зав}, \text{ кг/с}$	0,6706	0,6572	0,6314	0,6767	0,6715
$\Delta\eta$	0,0270	0,0269	0,0258	0,0268	0,0271
η_T^* (с учетом утечек)	0,8976	0,8992	0,8992	0,9006	0,8995

Изменение распределения степени реактивности при наклоне сопловых лопаток оказывает влияние на картину распределения скоростей в межлопаточных каналах РК. Так, при наклоне сопловых лопаток на ко-

рытце скорость потока на выходе из РК во втулочном сечении возрастает, а в периферийном – уменьшается. В условиях трансзвукового течения газа на выходе из РК указанное изменение скорости потока влияет в

основном на волновые потери, которые растут у втулки и снижаются у периферии. Расчеты показали, что в результате наклона сопловых лопаток на 10° на корытце суммарные потери в РК уменьшаются, но их снижение не превышает 0,1...0,15% (табл.1).

При использовании традиционных законов закрутки величина степени реактивности на среднем диаметре $\rho_{\text{ср}}$ выбирается сознательно завышенной из-за опасности возникновения отрицательных значений $\rho_{\text{вт}}$. Поскольку наклон сопловых лопаток позволяет снизить радиальный градиент степени реактивности, то применение таких СА дает возможность при проектировании ступени турбины закладывать пониженную степень реактивности $\rho_{\text{ср}}$. Это еще в большей мере позволяет снизить величину $\rho_{\text{пер}}$ и, следовательно, утечки через радиальный зазор. Кроме того, снижение степени реактивности приводит к снижению скорости потока в относительном движении и волновых потерь в РК.

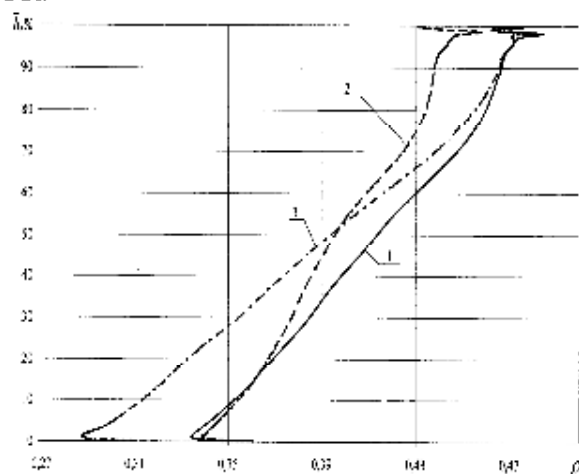


Рис. 4. Распределение степени реактивности ρ по высоте проточной части при простом наклоне: 1 — исходная лопатка (сплошная линия); 2 — лопатка с наклоном на корытце (пунктир); 3 — лопатка с наклоном на спинку (штрих-пунктир)

При использовании простого тангенциального наклона уменьшение потерь наблюдается только в одной части по высоте ЛВ СА. На остальных участках потери увеличиваются или остаются практически неизменными. Снизить потери в одной части по высоте ЛВ СА без их увеличения в других возможно с помощью сложного наклона.

При использовании сложного тангенциального наклона сопловых лопаток наблюдаются те же физические явления, что и в случае простого, с той разницей, что изменение картины течения газа происходит только в деформированной части ЛВ.

Как было отмечено выше, одним из положительных моментов от наклона сопловых лопаток является возможность увеличения втулочной степени реактивности $\rho_{\text{вт}}$. Это позволяет снизить волновые потери у втулки в СА, а также дает возможность при проектировании принять пониженную степень реактивности на среднем диаметре $\rho_{\text{ср}}$. Последнее обуславливает снижение потерь в РК и на утечки в радиальном зазоре.

Проведенные расчетные исследования показали, что увеличение втулочной реактивности возможно лишь при использовании сложного наклона по схемам 3 и 5 (рис.1).

При наклоне сопловых лопаток по варианту 3 для рассматриваемой ступени ТВД выигрыш в кпд составил 0,3% (абс.), а при наклоне по варианту 5 — 0,2% (табл.1). Меньший выигрыш по кпд в последнем случае объясняется повышенными утечками через радиальный зазор вследствие большей степени реактивности на периферии.

Обобщая проведенные исследования, следует сделать вывод о целесообразности применения сложного наклона сопловых лопаток по варианту 3 (рис.1), поскольку он обеспечивает наибольшее увеличение кпд трансзвуковой ступени турбины.

Библиографический список

1. Ковалев А.А., Струнkin В.А., Курцева И.И. Исследование влияния наклона сопловых лопаток на уровень переменных напряжений в рабочих лопатках турбины // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1977. — №3. — С. 129-131.
2. Епифанов В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З. Современные проблемы газодинамики решетки охлаждаемых лопаток перспективных газовых турбин // Теплоэнергетика. — 1994. — №9. — С. 8-12.
3. Yershov, S., Rusanov, A. Simulation of 3D unsteady viscous flow generated by interaction of reciprocally moving turbomachine cascades // Modelling and Design in Fluid-Flow

Machinery. Proc. IMP'97 Conf., 18–21 Nov. 1997, Gdańsk, Poland, 1997. – P. 153–160.

4. Ершов С.В., Русанов А.В. Комплекс программ FlowER[®] для расчета трехмерных вязких течений в многоступенчатых турбинах и компрессорах // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования // Тр. междуна-род. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 158 – 164.

References

1. Kovalev A.A., Strunkin V.A. and Kurtseva I.I. Nozzle blade pitch influence on turbine rotor blade fluctuating stress level // Aeronautical Engineering, 1997, #3. 129-131.

2. Epifanov V.M. Seigarnick Y.A. and Kopelev S.Z. Contemporary gas-dynamics problems of cooled cascade in prospective gas turbines // Heat and Power Engineering, 1994, #9. 8-12.

3. Yershov S., Rusanov A. Simulation of 3D unsteady viscous flow generated by interaction of reciprocally moving turbomachine cascades // Modelling and Design in Fluid-Flow Machinery. Proc. IMP'97 Conf., 18-21 Nov. 1997 Gdansk, Poland, 1997. 153-160.

4. Yershov S., Rusanov A. FlowER program system for calculation of 3D viscous flows in multistage turbines and compressors // Turboinstallations improvement by methods of mathematical and physical modeling. 3rd Science and Technology International Conference. Kharkov: Podgorny's EPI, 197. 158-164.

CALCULATED STUDY OF TANGENTIAL INCLINATION OF NOZZLE VANES INFLUENCE ON GAS-DYNAMIC EFFICIENCY OF AXIAL TURBINE STAGE

© 2008 O. V. Baturin. V. N. Matveev

Samara State Aerospace University

The result of calculated study are stated and the changes of flow and losses structure in vane rows in transonic turbine stage by the tangential inclination of nozzle vanes have been justified in given article. Recommendations on the choice of bent vanes shape of the nozzle vane row have been suggested.

Nozzle blade, turbine, effectiveness, pitch, force, periphery, suction face of blade, pan, pressure

Информация об авторах

Матвеев Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: tdla@ssau.ru. Область научных интересов: рабочие процессы микротурбомашин.

Батурин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 8-905-303-90-90, E-mail: udet@mail.ru. Область научных интересов: турбомашины, вычислительная газовая динамика, системы охлаждения.

Matveev Valeriy Nikolaevich, Doctor of Engineering Science, professor, head of Samara State Aerospace University "Theory of Aircraft Engines" department. E-mail: tdla@ssau.ru. Area of research: operation processes in microturbomachines.

Baturin Oleg Vitalyevich, Candidate of Engineering Science, associate professor of Samara State Aerospace University "Theory of Aircraft Engines" department. Phone: 8-905-303-90-90. E-mail: udet@mail.ru. Area of research: operation processes in microturbomachines.