

ВЫБОР МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОФИЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ЛОПАТОЧНОМ ВЕНЦЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

© 2017 О.В. Батури¹, А.Ю. Горшков², Г.М. Попов¹, А.А. Волков¹

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 23.03.2017

В статье приводятся результаты исследования пяти моделей, используемых для оценки профильных потерь в решетках осевых турбин: Соделберга, Анлея и Метисона, Данхема и Кейма, Какера и Окапу и ЦИАМ (Россия). Результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными для 170 решеток профилей осевых турбин, отражающих все многообразие профилей лопаток осевых турбин, используемых в авиационном газотурбинном двигателе. Прямое сопоставление результатов расчета и эксперимента не позволило однозначно выбрать наилучшую модель. Поэтому был разработан метод анализа моделей потерь, основанный на статистическом анализе отклонения данных расчета и эксперимента. Показано, что полученные отклонения подчиняются нормальному закону распределения. На основании анализа математических ожиданий и среднеквадратических отклонений было установлено, что результаты, наиболее приближенные к данным эксперимента, из рассмотренных моделей показывает модель ЦИАМ. С вероятностью 95% она показывает отклонение от действительных значений потерь $2 \pm 82\%$.

Ключевые слова: турбина, математическая статистика, потери, модель

Осевая турбина широко распространена в разных областях техники. Она применяется в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД), турбохолодильниках, агрегатах наддува, вспомогательных силовых установках, промышленных энергоустановках и газотурбинных электростанциях. По этой причине любая работа, направленная на повышение энергетической эффективности осевой турбины является актуальной и сулит большой экономический эффект.

Сегодня основным инструментом анализа рабочего процесса турбомашин являются методы вычислительной газовой динамики (CFD), основанные на численном решении системы уравнения Навье-Стокса. Сейчас это самый точный расчетный инструмент в руках инженера, который позволяет с высокой достоверностью изучить структуру течения в канале любой формы с учетом всех нюансов реальной геометрии проточной части, таких как, галтели, зазоры, уступы, реальные эпюры распределения параметров по высоте каналов и т.п. [1]. Важная особенность CFD методов заключается в том, что по сути это поверочный расчет. Для проведения расчета нужно иметь полное представление о геометрии исследуемого узла. Она, как и много лет назад, получается в результате проектных 1 и 2D расчетов. В этой связи задача развития методов проектирования осевых турбин с помощью моделей низкого уровня не теряет свою актуальность. Это связано с тем, что чем более достоверны будут результаты

проектного расчета, тем ближе проектная геометрия окажется к наилучшей для проектируемого изделия, и тем меньшее число обращений к дорогой в вычислительном плане CFD модели потребуются. В конечном итоге это приведет к сокращению времени получения финального варианта турбины и уменьшению необходимых для этого средств.

Ключевым вопросом повышения качества проектирования турбин является достоверное предсказание потерь энергии в ее проточной части. На сегодняшний день известно более десятка комплексных моделей, позволяющих рассчитать потери в осевых турбинах и еще несколько десятков уравнений, позволяющих рассчитать различные компоненты потерь [2, 3, 5, 6]. Эти модели потерь и уравнения были получены в течение последних 70 лет разными исследователями в разных странах. Авторы статьи поставили себе цель выяснить, какая из известных моделей точнее всего позволяет определить значение профильных потерь и характер их изменения под действие различных геометрических и режимных факторов. В дальнейшем планируется провести подобные исследования для других видов потерь, и найти наилучшую комплексную модель потерь.

Из найденных авторами зависимостей для оценки профильных потерь были выбраны наиболее часто используемые и те, которые легко (без проведения дополнительных операций, например, построения средней линии профиля) могут быть вычислены по известным геометрическим параметрам решетки профилей. Всего рассматривалось пять моделей профильных потерь: Соделберга (Sodelberg) (Sodelberg) [2, 3, 5], Анлея и Метисона (Ainley&Mathieson) (A&M) [2, 3, 5, 6], Данхема и Кейма (Dunhem&Came) (D&C) [2, 3], Какера и Окапу (Kaker&Ocapu) (K&O) [2, 3] и Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ) (CIAM).

Батури¹ Олег Витальевич, доктор технических наук. E-mail: oleg.v.baturin@gmail.com

Горшков² Алексей Юрьевич, инженер. E-mail: gorshkov.rabota@gmail.com

Попов¹ Григорий Михайлович, инженер. E-mail: grishatty@gmail.com

Волков¹ Андрей Александрович, инженер. E-mail: a44rey@gmail.com

Краткие данные о выбранных моделях потерь приводятся ниже.

С помощью упомянутых выше моделей потерь были рассчитаны значения профильных потерь в более, чем 170 решетках осевых турбин, геометрические и режимные параметры которых были взяты из источника [1]. Данный источник представляет собой справочник, содержащий данные экспериментальных продувок незакрученных по высоте решеток турбин, полученных на различных моторо-

строительных предприятиях бывшего СССР. Данная информация была собрана и обобщена в ЦИАМ. Пример, информации о решетке и данных ее экспериментального исследования приведен на рис. 1. Диапазоны варьирования основных параметров рассмотренных турбинных решеток представлены в табл. 1. Рассматриваемый массив решеток отражает все многообразие профилей лопаток осевых турбин, используемых в авиационном ГТД.

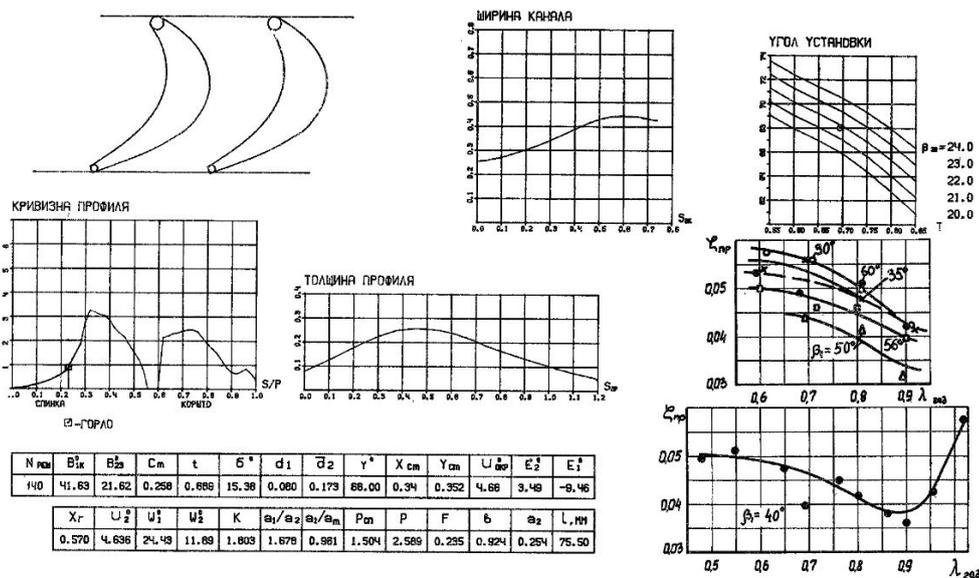


Рис. 1. Пример информации о решетке турбины и данные ее экспериментального исследования в источнике [4]

Таблица 1. Диапазоны варьирования основных параметров рассмотренных турбинных решеток

Название	Обозначение	Минимальное значение	Максимальное значение
приведенная скорость	λ_{w2s}	0,35	1,5
лопаточный угол на входе	β_1 , град	29	105
лопаточный угол на выходе	β_2 , град	7	44
угол поворота потока	$\Delta\beta$, град	61	137
относительная толщина лопатки	$\bar{c}_m = C_m/h$	0,08	0,36
относительное положение максимальной толщины	\bar{X}_c	0,09	0,47
угол отгиба профиля	δ , град	-6	33
относительный шаг	t/b	0,505	1,05
относительная величина горла	a_2/h	0,106	0,745
относительная толщина выходной кромки	$2r_2/a_2$	0,044	0,31
степень конфузности канала	K	0,9	8,3

Примечание: величины углов потока в данной статье отсчитываются от фронта решетки

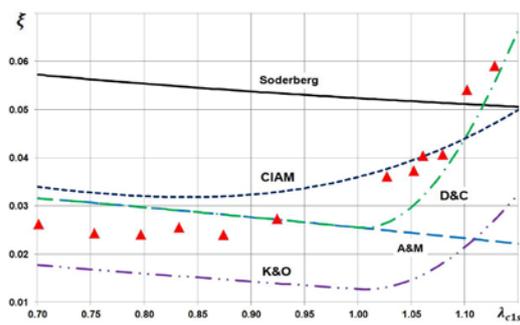
Среди экспериментальных данных для каждой рассмотренной решетки имеется зависимость значения коэффициента профильных потерь ξ от изоэнтропической скорости на выходе из решетки λ_{w2s} . Подобные зависимости были получены для всех 170 решеток с помощью описанных выше моделей потерь и сопоставлены с экспериментальными данными. Результаты сопоставления для решеток №42, 65, 119, 135, 156, 174, выбранных случайным образом, показаны на рис. 2. Названные номера

решеток соответствуют номерам в источнике [1]. Как видно из сравнения графиков на рис. 2, полученные данные не позволяют однозначно сказать, какая из моделей потерь является наилучшей. Любая из использованных моделей может для одной решетки давать практически полное совпадение, а для другой решетки показывать значение потерь, отличающееся от реального в 2 и более раза. Следует отметить, что чаще всего совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается в около-

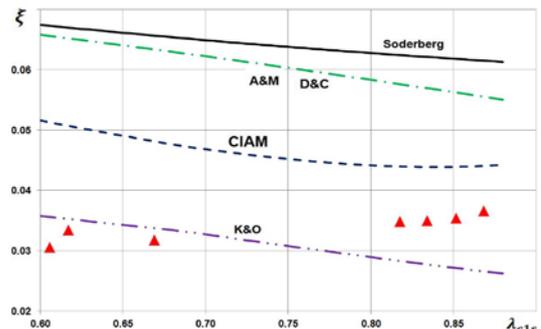
звуковом диапазоне. При больших сверхзвуковых скоростях совпадения случаются существенно реже. В частности, модели Соделберга и Анлея и Меттисона для сверхзвуковых скоростей потока в решетке принципиально неверно описывают тенденцию изменения потерь с ростом скорости течения. В дозвуковом диапазоне модели Анлея и Меттисона и Данхема и Кейма показывают идентичные результаты.

Для того, чтобы решить возникшую проблему и однозначно сказать, какая из моделей профильных потерь показывает лучшие результаты, был предложен следующий алгоритм. На первом этапе

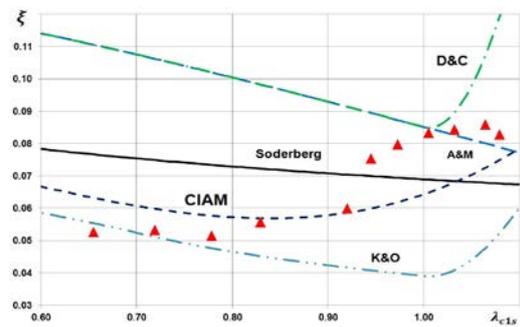
для каждой решетки массив экспериментальных данных был описан с помощью одного или нескольких регрессионных уравнений. Регрессионные уравнения представляли собой полиномы 3-6 степени вида $\xi_{эксп} = f(\lambda_{c1s})$. С помощью полученных регрессионных уравнений для каждой решетки были вычислены ожидаемые в эксперименте значения профильных потерь $\xi_{эксп}$ при значениях изоэнтропической приведенной скорости λ_{w2s} от 0,6 до 1,2 с шагом 0,05. Аналогичным образом можно оценить ожидаемое значение профильных потерь при любом значении приведенной скорости λ_{w2s} .



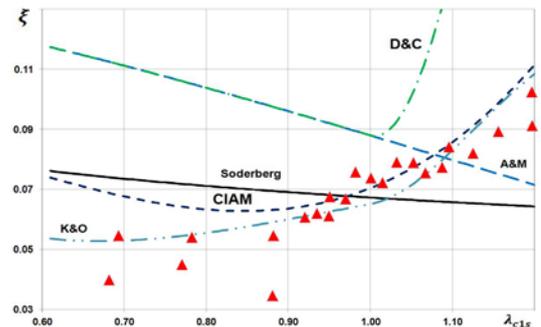
Решетка №42



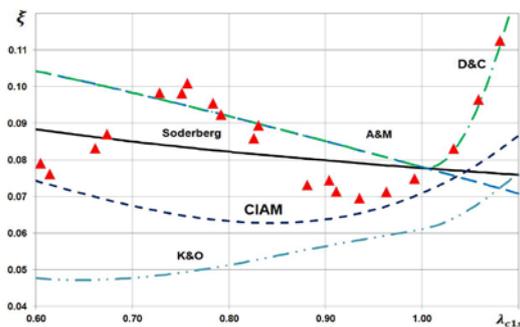
Решетка №65



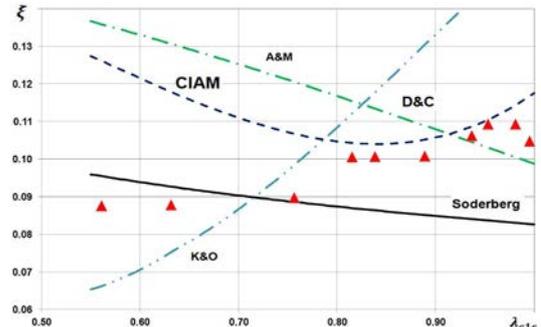
Решетка №119



Решетка №135



Решетка №156



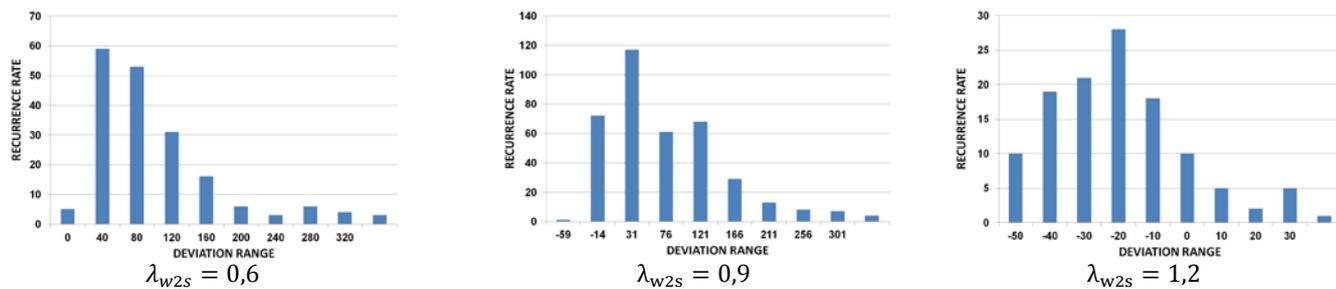
Решетка №174

Рис. 2. Сопоставление результатов расчета профильных потерь с помощью разных моделей с данными эксперимента

Значения профильных потерь $\xi_{расч}$ для тех же значений λ_{w2s} были также рассчитаны для всех решеток с помощью выбранных моделей потерь. Затем для каждого вычисленного значения потерь было найдено его отклонение от ожидаемого экспериментального значения:

$$\Delta\xi = \frac{(\xi_{расч} - \xi_{эксп})}{\xi_{расч}} \cdot 100\%.$$

Таким образом, для каждой рассматриваемой модели потерь и для каждого рассмотренного значения приведенной скорости λ_{w2s} было получено множество отклонений расчетных значений от экспериментальных данных $\Delta\xi$. Каждое значение отклонения в каждом множестве соответствовало одной из рассмотренных решеток профилей (рис. 3-7).



ис. 3. Гистограммы распределения значений отклонения для модели потерь Соделберга при разных значениях приведенных изоэнтропических скоростей потока

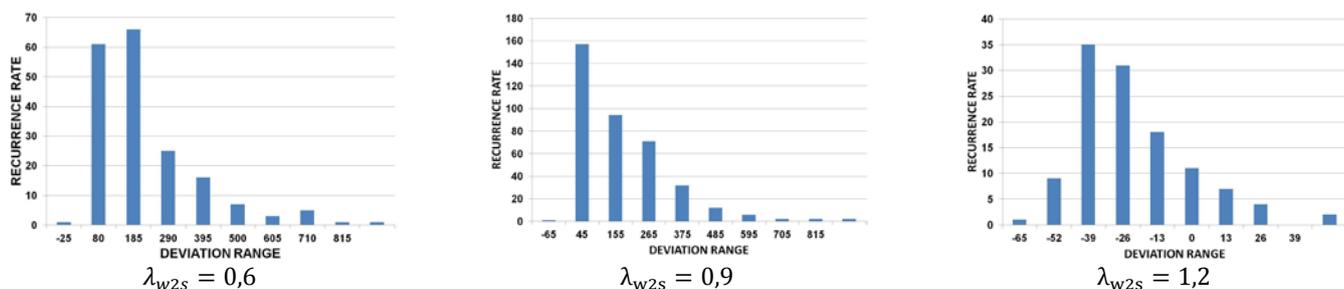


Рис. 4. Гистограммы распределения значений отклонения для модели потерь Анлия и Меттисона при разных значениях приведенных изоэнтропических скоростей потока

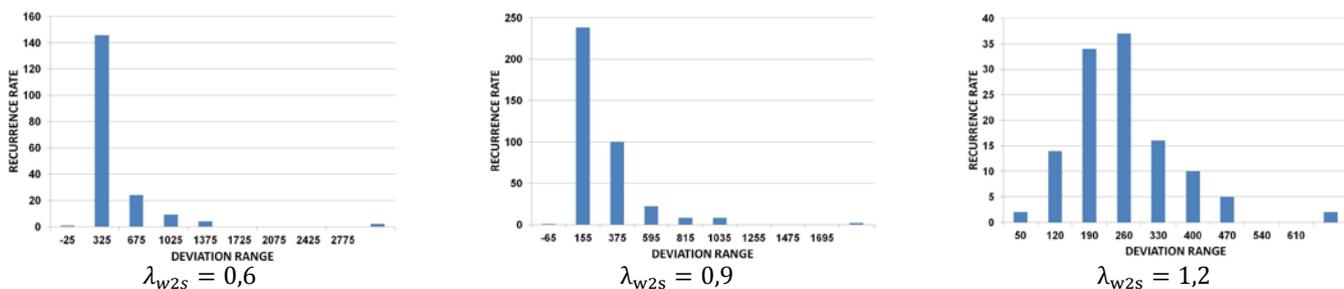


Рис. 5. Гистограммы распределения значений отклонения для модели потерь Данхема и Кейма при разных значениях приведенных изоэнтропических скоростей потока

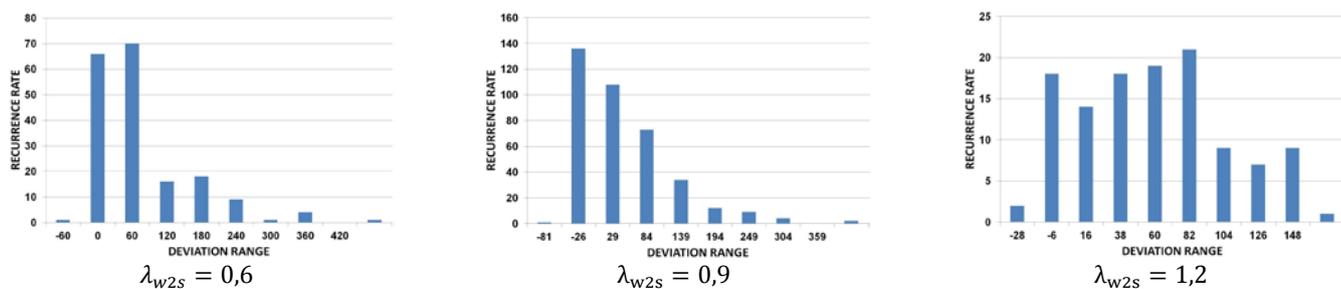


Рис. 6. Гистограммы распределения значений отклонения для модели потерь Какера и Окапу при разных значениях приведенных изоэнтропических скоростей потока

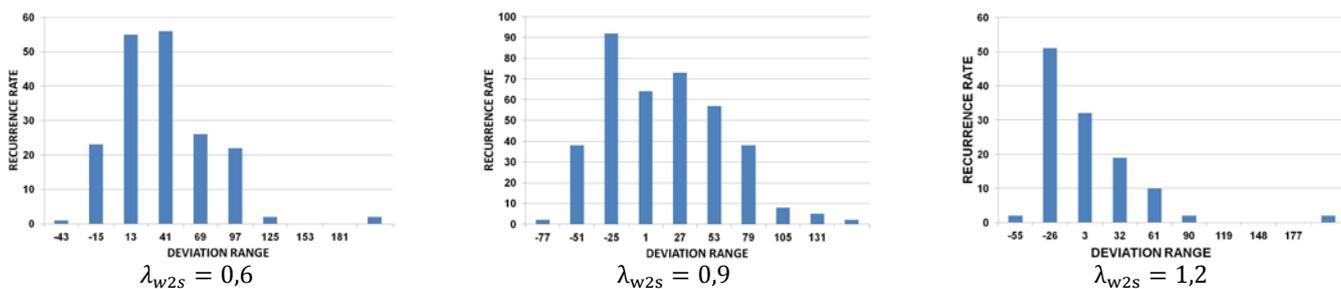


Рис. 7. Гистограммы распределения значений отклонения для модели потерь ЦИАМ при разных значениях приведенных изоэнтропических скоростей потока

Статистический анализ полученных данных показал, что внутри каждого полученного множества значение $\Delta\xi$ подчиняется нормальному закону распределения. Это позволяет для каждой рассмотренной модели потерь, для каждого рассмотренного значения изоэнтропической приведенной скорости λ_{w2s} указать наиболее вероятное значение (математическое ожидание) $\mu_{\Delta\xi}$ отклонения данных расчета от эксперимента $\Delta\xi$, среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta\xi}$, а также величину отклонения от среднего значения с вероятностью 95%, и найти численные значения $\mu_{\Delta\xi}$ и $\sigma_{\Delta\xi}$.

На рис. 8 показано, как изменяются наиболее вероятное значение отклонения расчетных данных от экспериментальных $\Delta\xi$ для разных значений изоэнтропической приведенной скорости λ_{w2s} для всех рассмотренных моделей потерь. На том же рисунке обозначены найденные максимальные и

минимальные возможные значения отклонений $\Delta\xi$ с вероятностью 95%, т.е. с указанной вероятностью отклонение вычисленного значения потерь от действительного значения на графиках рис. 3 будет лежать между кривыми, соответствующими максимальному и минимальному отклонениям.

Анализ данных на рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что все рассматриваемые модели профильных потерь показывают наилучшие результаты (наименьшее отклонение наиболее вероятного значения и значение среднеквадратичного отклонения) в диапазоне приведенных скоростей от 0,8 до 1,2. Все рассмотренные модели потерь с большой вероятностью превышают значения профильных потерь при дозвуковых скоростях течения (λ_{w2s} менее 0,8). При этом отмечается большие, превышающие 200% среднеквадратические отклонения.

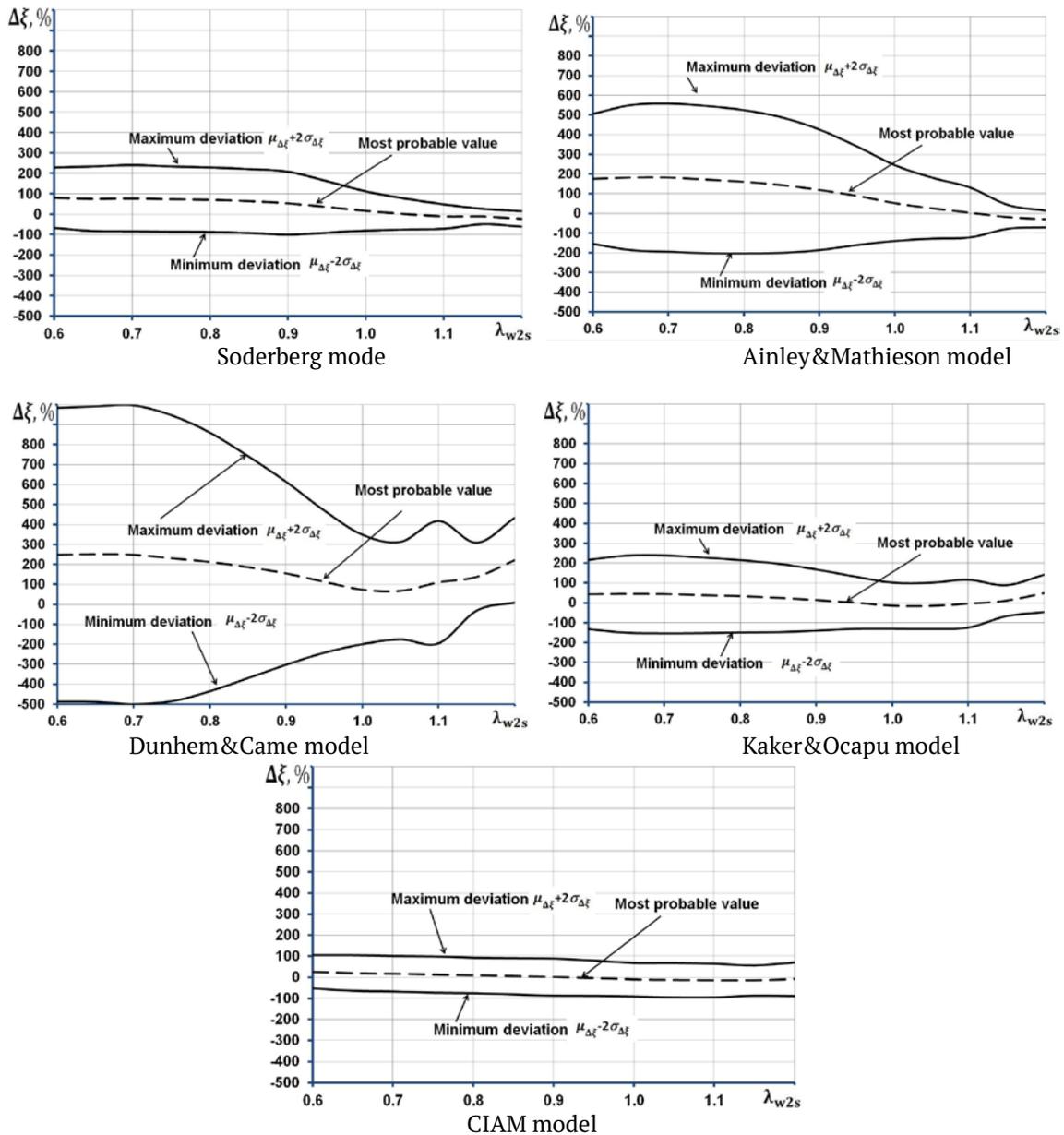


Рис. 8. Изменения наиболее вероятного значения отклонения расчетного значения профильных потерь от действительных значений и границ рассеивания с вероятностью 95% в зависимости от изоэнтропической приведенной скорости λ_{w2s} для разных моделей потерь

По мере приближения скоростей к скорости звука уменьшается значение среднеквадратических отклонения, а значение наиболее вероятного значения уменьшается и для ряда моделей (Sodelberg, A&M, CIAM) становится отрицательным, что говорит о занижении расчетной оценки потерь. Наихудшие результаты из рассмотренных моделей показывает модель Данхема и Кейма, показывающая как большое математическое ожидание $\mu_{\Delta\xi}$, так и среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta\xi}$. Их средние арифметические значения по всему рассматриваемому диапазону составляют 173% и 237% соответственно. Наилучшие результаты показывают модели Какера и Окапу (средние арифметические значения во всем в рассматриваемом диапазоне $\mu_{\Delta\xi} = 20\%$; $\sigma_{\Delta\xi} = 73\%$) и ЦИАМ (средние арифметические значения во всем в рассматриваемом диапазоне $\mu_{\Delta\xi} = 2\%$; $\sigma_{\Delta\xi} = 41\%$). В целом обе указанные модели показывают близкие друг к другу статистические результаты, особенно в трансзвуковой области, однако предпочтение следует все же отдать модели ЦИАМ, поскольку у нее наименьшее значение как математического ожидания, так и среднеквадратичного отклонения из всех моделей. Более того, это значение стабильно, и мало меняется с величиной скорости течения. Также при анализе рис. 9 обращают на себя внимание неплохие статистические результаты показанные моделью Соделберга. Несмотря на солидный возраст и свою некоторую примитивность, данная модель показывает в среднем следующие результаты (средние

арифметические значения во всем в рассматриваемом диапазоне $\mu_{\Delta\xi} = 38\%$; $\sigma_{\Delta\xi} = 58\%$).

Представленная работа является первым этапом к поиску наилучшей модели потерь для осевой турбины и касается только профильных потерь. В дальнейшем аналогичным образом планируется проанализировать другие виды потерь, имеющие место в межлопаточном канале осевой турбины. В итоге планируется достоверно определить, какая модель является лучшей, либо разработать новую, превосходящую по точности существующие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1 *Венедиктов, В.Д.* Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин / *В.Д. Венедиктов, А.В. Грановский* // ЦИАМ. 1990. 393 с.
- 2 *Horlock, J.H.* Axial Flow Turbines. – М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
- 3 *Dahlquist, A.N.* Investigation of Losses Prediction Methods in 1D for Axial Gas Turbines // Institute of Technology Lund University. – Sweden, 2008. 192 p.
- 4 *Dunham, J.* Improvements to the Ainley-Mathieson Method of Turbine Performance Prediction / *J. Dunham, P.M. Came* // ASME Journal of Engineering for Power. 1992. №3. P. 252-256.
- 5 *Kacker, S.C.* A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency / *S.C. Kacker, U. Okapu* // ASME Journal of Engineering for Power. 104(2). pp. 111-119.
- 6 *Абиани, В.Х.* Теория газовых турбин реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. 246 с.

THE CHOICE OF MODEL FOR THE ASSESSMENT OF PROFILE LOSSES IN THE BLADE ROWS BY MEANS OF MATHEMATICAL STATISTICS METHODS

© 2017 O.V. Baturin, A.Yu. Gorshkov, G.M. Popov, A.A. Volkov

Samara National Research University named after acad. S.P. Korolyov

Results of research the five models, used for assessment of profile losses in axial turbines cascade: Sodelberg, Anley and Matheson, Dankhem and Keym, Kaker and Okapa and TsIAM (Russia) are given in article. Results of calculation were compared with the experimental data for 170 airfoil cascades of the axial turbines, reflecting all variety of blade profiles of axial turbines used in the aviation gas-turbine engines. Direct comparison of calculation results and an experiment did not allow to choose the best model unambiguously. Therefore the method of the analysis of losses models based on statistical analysis of rejection data of calculation and an experiment was developed. It is shown that the received deviations submit to the normal distribution law. On the basis of the analysis of expectations, and mean squared deviations of it was established that the results which are brought most closer to data of an experiment from the considered by CIAM model are shown. With probability of 95% it shows a deviation from the real values of losses 2x82%.

Key words: turbine, mathematical statistics, losses, model

Oleg Baturin, Doctor of Technical Sciences. E-mail:

oleg.v.baturin@gmail.com

Aleksey Gorshkov, Engineer. E-mail:

gorshkov.rabota@gmail.com

Grigoriy Popov, Engineer. E-mail:

grishatty@gmail.com

Andrey Volkov, Engineer. E-mail: a44rey@gmail.com