

А. С. МАКСУДЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА КОНЦЕВЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ПРЯМОЙ РЕШЕТКЕ РЕАКТИВНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В статье приводятся результаты экспериментального исследования влияния шероховатости на профильные и концевые потери энергии в прямой обandaженной решетке реактивных профилей. Работа выполнена на аэродинамическом стенде для статических испытаний в лаборатории турбиностроения ЛПИ им. М. И. Калинина.

Решетка была набрана из лопаток с профилем периферийного сечения ступени газовой турбины при следующих параметрах: хорда лопатки $b = 48$ мм, относительный шаг $t = t/b = 0.64$, угол установки $\beta_0 = 36^\circ$ и относительное удлинение $l = l/b = 2.2$. Конструкция решетки позволяла осуществлять смену трех смежных лопаток, расположенных посередине. Высокая чистота поверхностей получалась путем механической обработки. Повышенная шероховатость создавалась методом наклеивания на поверхность тонкослойным лаком измерного абразивного порошка. Количественные данные сведены в таблицу.

Средняя высота бугорков, мм	Относительная шероховатость, k/δ	Класс чистоты по ГОСТ 2789-59	Способ получения
3	$0.063 \cdot 10^{-3}$	8	механическая обработка
8	$0.166 \cdot 10^{-3}$	6	"
10	$0.83 \cdot 10^{-3}$	4	абразивный порошок
70	$1.45 \cdot 10^{-3}$	3	"
100	$2.08 \cdot 10^{-3}$	2	"
130	$2.7 \cdot 10^{-3}$	2	"
260	$5.4 \cdot 10^{-3}$	1	"

Опыты проводились при значении числа $Ma < 0.5$. Число Рейнольдса, подсчитанное по выходной скорости и хорде лопатки, составляло

$$Re = \frac{\omega_2 \cdot b}{\nu} = 4.4 \cdot 10^5.$$

Опытные данные обрабатывались по известной методике ЦКТИ, а концевые потери энергии на единицу длины лопатки определялись как разность полных и профильных потерь.

$$\tau_{\text{кон.}} = \tau_{\text{пол.}} - \tau_{\text{проф.}}$$

На рис. 1 изображено изменение коэффициента потерь энергии по высоте лопатки при различной шероховатости поверхностей, ограничивающих канал. Как видно из графиков, увеличение шероховатости приводит к значительному возрастанию потерь энергии не только в области плоского потока, но и во всей зоне по высоте лопатки, охваченной концевыми явлениями. При этом увеличение потерь энергии с

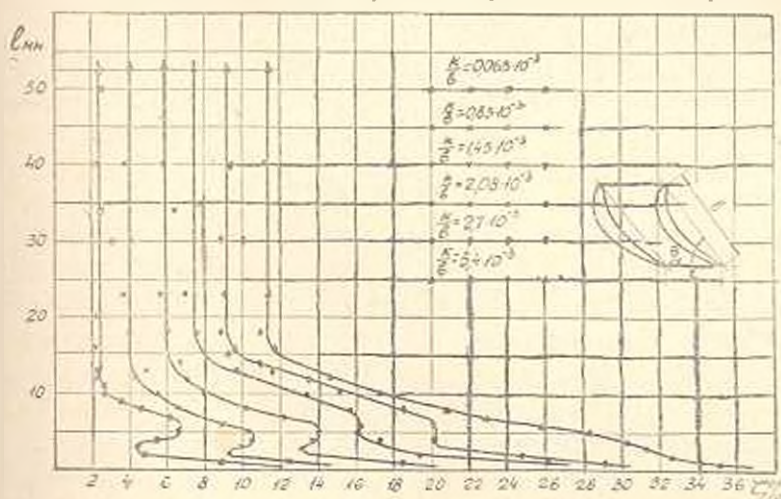


Рис. 1. Изменение потерь энергии по высоте лопатки в зависимости от шероховатости.

повышением шероховатости оказывается неодинаковым на разных расстояниях от торцевой стенки, что и следовало ожидать из-за переменной толщины пограничного слоя и различного его характера на отдельных участках у концов лопаток.

Известно, что при режиме аэродинамически гладкого обтекания лопаток давления вблизи концов на выпуклой поверхности повышается из-за уменьшения скоростей потока и создается перепад давления вдоль образующей лопатки, вызывающий интенсивное перетекание подторможенного слоя жидкости от периферии к средним сечениям. При достаточном перепаде давлений, течение жидкости на выходном участке выпуклой поверхности лопатки в непосредственной близости от стенок происходит с уменьшением давления несмотря на то, что в основном потоке на некотором расстоянии от торцевых стенок давление возрастает. Здесь же достигают наибольших значений составляющие скоростей вдоль образующих лопаток и наблюдается относительно небольшое утолщение пограничного слоя, приводящее к уменьшению потерь энергии при условии гладких лопаток. На этих участках шероховатость оказывает особенно сильное влияние на потери энер-

гии (рис. 1). С увеличением шероховатости сокращается, а затем и вовсе исчезает нижний участок области увеличения ζ из-за вторичных течений. На этом участке в условиях аэродинамически гладкого течения наблюдается более резкое возрастание потерь, чем со стороны среднего сечения лопатки. Несколько увеличивается и затем остается практически неизменной протяженность по высоте лопатки участка повышенных потерь. Увеличение потерь в месте набухания пограничного слоя на выпуклой поверхности становится менее заметным. Это объясняется, по-видимому, повышением сопротивления шероховатой поверхности, а также уменьшением скоростей периферийного движения с возрастанием массы жидкости из-за утолщения пограничного слоя на торцевых стенках и обводах профиля.

При обтекании гладких лопаток главную часть концевых потерь составляют потери, возникающие в области разбухания пограничного слоя на стенке лопатки. Дополнительные потери возникают из-за трения в пограничном слое на торцевых стенках.

Как видно на рис. 1, вместе с резким возрастанием потерь с повышением шероховатости непосредственно у концов лопаток увеличивается доля концевых потерь из-за трения на торцевой стенке и сравнительно большая часть лопатки по ее высоте оказывается в зоне повышенных потерь в пограничном слое на торцах. Благодаря этому, а также из-за интенсивного сокращения области пониженных потерь, вблизи концов лопатки, дальнейшее увеличение шероховатости приводит к плавному переходу участков с повышенными потерями у торцевой стенки и со стороны среднего сечения лопатки. Суммарная величина концевых потерь в решетке с увеличением шероховатости сильно растет.

На рис. 2 представлены опытные кривые зависимости коэффициента профильных и полных потерь энергии от относительной шероховатости k/b . Аналогичная зависимость для коэффициента концевых потерь в решетке изображена на рис. 3. Характер кривой для концевых потерь сохраняется таким же, что и для профильных.

Здесь также имеют место известные режимы течения в зависимости от соотношения размеров бугорков шероховатости и толщины ламинарного подслоя.

Во втором предельном режиме течения, изменение концевых потерь можно выразить приблизительно так

$$\frac{\zeta_{\text{конп.}} \cdot \left(\frac{k_1}{b}\right)}{\zeta_{\text{конп.}} \cdot \left(\frac{k_2}{b}\right)} = \frac{\zeta_{\text{проф.с}} \cdot \left(\frac{k_1}{b}\right)}{\zeta_{\text{проф.с}} \cdot \left(\frac{k_2}{b}\right)},$$

Достаточно близкое соответствие с экспериментальными данными для коэффициента профильных потерь получается при расчете по формуле Г. А. Зальфа [1]

$$\zeta_{\text{кон.}} = \frac{4 \cdot \xi}{10^m \cdot \xi \cdot \sin \beta} \left(\frac{k}{b} \right)^m$$

и значения коэффициента ξ , зависящего от числа Рейнольдса, равном $\xi = 0,13$. Для испытанной решетки показатель степени m оказался равным 0,28.

Отметим, что результаты опытов относятся к случаю, когда пограничные слои на лопатках и торцевых стенках начинают развиваться

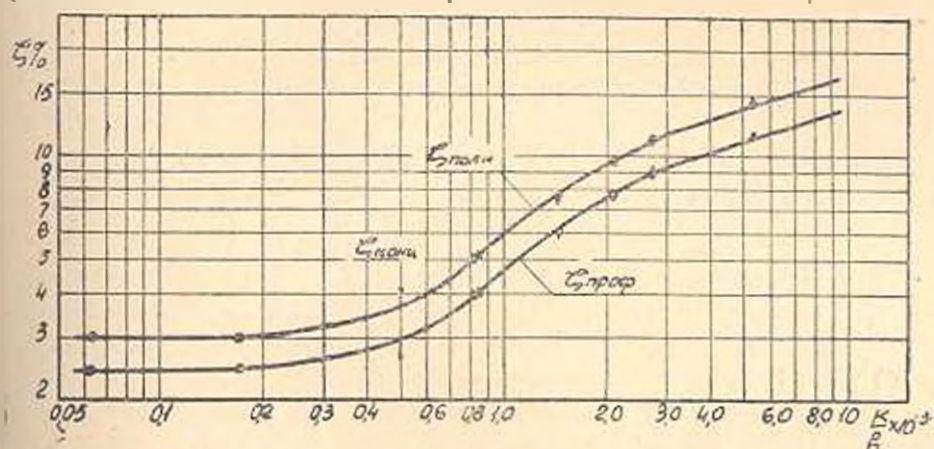


Рис. 2. Зависимость коэффициента профильных и полных потерь энергии от шероховатости.

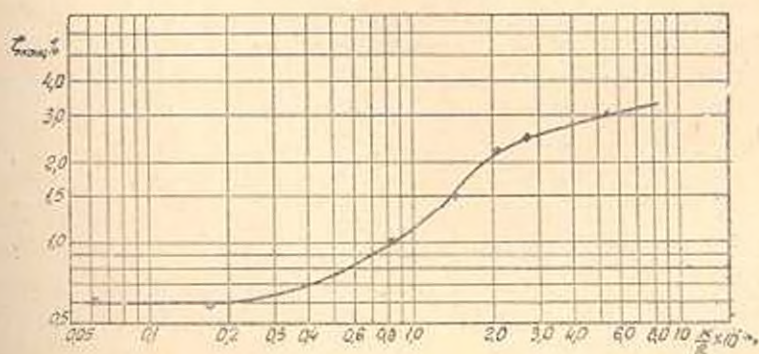


Рис. 3. Зависимость коэффициента концевых потерь от шероховатости поверхности.

ся и взаимодействуют в условиях одинаковой шероховатости их поверхности. Иначе будет обстоять дело, когда шероховатость торцевых стенок и криволинейных поверхностей, ограничивающих канал, резко различна. В этом случае сравнительно тонкий и недостаточно развитый пограничный слой взаимодействует с развитым слоем другой поверхности. Следует ожидать, что взаимодействие пограничных слоев, сильно отличающихся по условиям развития, приведет к изменению характера зависимости потерь энергии у концов лопаток.

По результатам произведенных экспериментальных исследований было установлено, что шероховатость поверхности лопаток и торце-

вои стенки оказывает сильное влияние на концевые потери энергии, с повышением шероховатости растет доля концевых потерь из-за трения на торцевых стенках: коэффициент концевых потерь энергии испытанной решетки изменяется при втором предельном режиме течения приблизительно так же, как и коэффициент профильных потерь.

ЛПИ им. Калужина

Поступило 17.IV 1965

Ա. Ս. ՄԱՔՍՍԻԱՆ

ԴԵՎԿՏԻԿ ՊԵՐՅԱՆՆԵՐԻ ՈՐՎԻԼ ՅԱՆՅՈՒՄ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՄԱՅՐԱՅԻՆ
ԿՈՐՐԵՍՏՆԵՐԻ ՎՐԱ ՄԱԿԵՐԵԼՈՒՅԻԻ ԿՈՐԴՈՒՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅԱՆ
ԷՔՍՊԵՐԻՄԵՆՏԱԼ ՈՒՍՈՒՄՆԱԿԱՆՐԱԻՅՈՒՆԸ

Ա. Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Վ

Ստատիկ փորձերի հիման վրա հոգվածում բերված է չերմակայուններում է աչլ ախլի չերմութաչին սարքավորումներում սղատադործող տորրինների էներգիայի կորուստների փոփոխման օրինաչափությունը՝ կախված տորրինային թիակների մակերևույթի մաքրությունից:

Ստացված փորձնական տվյալները կարող են օգտագործվել տորրինների կոնստրուկտորական հաշվարկների լամար և նրանց շա ագործման մամանակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Зальв F. A. Тепловой расчет стационарных газовых турбин, М. — М., 1964.