

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

ВЛИЯНИЕ ШАГА ТУРБИННОЙ РЕШЕТКИ НА ПОТЕРИ ОТ УГЛА АТАКИ

© 2022 г. Б. И. Мамаев^{a, *}, С. А. Полубояринова^{a, **}, А. В. Стародумов^{a, ***}

^aОКБ им. А. Люльки, филиал ПАО ОДК-УМПО, ул. Касаткина, д. 13, Москва, 129301 Россия

*e-mail: boris.mamaev35@mail.ru

**e-mail: poluboyarinova_sa@okb.umpo.ru

***e-mail: andrey.starodumov@okb.umpo.ru

Поступила в редакцию 08.04.2021 г.

После доработки 28.04.2021 г.

Принята к публикации 26.05.2021 г.

Рассмотрены результаты исследований плоских дозвуковых и трансзвуковых решеток с конфузурностью $K_p = 1.2–3.1$. Исследовались серии по три-четыре решетки в каждой с неизменным профилем и разным относительным шагом: всего девять серий с постоянным углом установки и одиннадцать серий с постоянным эффективным углом выхода $\beta_{2\text{эф}}$. Диапазон изменения шага в сериях составлял примерно 25% при значениях больших и меньших оптимального. Решетки испытывались в основном при угле атаки $\Delta\beta_1$ от -20° до 20° и скорости выхода потока $\lambda_2 \approx 0.6–0.9$. Эксперименты показали, что для решеток большой конфузурности $K_p \geq 2.9$ коэффициент потерь в решетке $\Delta\zeta = 0$ и не изменяется при вариации шага и при всех обследованных значениях $\Delta\beta_1$ и λ_2 . В решетках меньшей конфузурности при отрицательных $\Delta\beta_1$ и положительных $\Delta\beta_1 \leq 5^\circ$ можно принять, что значение $\Delta\zeta$ не зависит от шага. При $\Delta\beta_1 > 5^\circ$ увеличение шага ведет к росту значения $\Delta\zeta$ при снижении конфузурности решетки и скорости выхода потока. Рост потерь объясняется ухудшением обтекания входного участка спинки профиля, где возрастает пик скорости. Анализ потерь показал, что зависимости $\Delta\zeta(\bar{t})$ в сериях можно принять линейными. Это позволило получить обобщенную зависимость для относительного изменения потерь при варьировании шага в функции K_p , $\Delta\beta_1$ и λ_2 . Исследование, в котором с использованием расчетов вязкого потока сравнивались для различных заданных условий потока две серии решеток разного шага с неизменным профилем и со специально построенными профилями для каждого шага, показало, что выявленное в процессе экспериментов влияние шага на потери от угла атаки может быть использовано и при оптимизации решеток.

Ключевые слова: турбинная решетка, профиль решеток, конфузурность, относительный шаг, угол атаки, обтекание, потери, коэффициент потерь, продувка, диффузурность канала

DOI: 10.1134/S0040363622010027

Один из параметров, определяющих газодинамические характеристики турбинных решеток профилей, – относительный шаг $\bar{t} = t/b$ (здесь t – шаг, b – хорда) (рис. 1). Влияние шага учитывается при анализе работы турбины, когда требуется найти потери, и на этапе проектирования, когда при построении профильных решеток выбираются значения их шага.

Естественно ожидать, что шаг \bar{t} влияет на коэффициент потерь в решетке $\Delta\zeta = \zeta - \zeta_0$ (здесь ζ – коэффициент потерь при $\Delta\beta_1 \neq 0$, ζ_0 – то же при $\Delta\beta_1 = 0$) от угла атаки. Однако в литературе на этот счет указания нечеткие. В [1, 2] указывается, что влияние шага следует учитывать, хотя и не приводятся зависимости для оценки $\Delta\zeta(\bar{t})$, а в других источниках ([3–5] и др.) это влияние не обнаружено.

Сложность ответа на этот вопрос заключается в том, что теоретического решения задачи о потерях от угла атаки нет, а численные методы расчетов нестационарного вязкого потока с отрывами пока еще не дают надежных результатов. Зависимости, основанные на обобщении экспериментальных данных, также грешат большими погрешностями [6]. К тому же для упрощения экспериментов при изменении шага профиль решеток, как правило, остается неизменным. Если при этом $\gamma = \text{const}$, то изменяются эффективный угол выхода $\beta_{2\text{эф}} = \arcsin(a_2/t)$ и геометрическая конфузурность решетки $K_p = \sin\beta_{1к}/\sin\beta_{2\text{эф}}$. Если путем изменения угла установки обеспечивается $\beta_{2\text{эф}} = \text{const}$, то изменяются угол $\beta_{1к}$ и снова конфузурность решетки K_p . Происходят обязательные изменения и других параметров, например углов $\beta_{2к}$ и δ . При проектировании для решетки каждого шага может быть построен свой профиль и выбрано под-

изменении шага на примерно 25%, отрицательных углах атаки и $\Delta\beta_1 \leq 5^\circ$ можно принять, что значение $\Delta\zeta$ не изменяется, а при $\Delta\beta_1 > 5^\circ$ увеличение шага ведет к некоторому росту коэффициента потерь $\Delta\zeta$ (рис. 2).

В ЦИАМ были исследованы 11 серий сопловых и рабочих решеток с $K_p = 1.2-3.1$ и разным шагом. В каждой серии изменения шага происходили при значениях \bar{t} больших и меньших оптимального $\bar{t}_{\text{опт}}$ и сопровождались изменениями угла γ для сохранения $\beta_{2\text{эф}} \approx \text{const}$. Сопловые решетки продувались при $\lambda_2 = 0.6-1.05$, а рабочие – при $\lambda_2 = 0.6-0.9$ [9].

Серия сопловых решеток на углы $\beta_1 = 90^\circ$ и $\beta_{2\text{эф}} = 19^\circ$ содержала решетки № 2, 12, 23 и 30 с шагом $\bar{t} = 0.505-1.010$. Значение $\bar{t}_{\text{опт}}$ составляло 0.87 при $\lambda_2 = 0.8$. Угол $\beta_{1\text{к}}$ изменялся от 93° до 104° , что приводило к небольшому изменению конфузурности $K_p = 2.9-3.1$. Решетки продувались при $\Delta\beta_1$ от -20° до 30° . В экспериментах сохранялось $\Delta\zeta = 0$ при всех обследованных значениях шага, λ_2 и $\Delta\beta_1$ (рис. 3). Это объясняется большой конфузурностью решеток, при которой скорость потока на входе мала и обтекание при разных углах $\Delta\beta_1$ существенно не изменяется. Такую устойчивость решетки можно использовать при выборе значения $\beta_{1\text{к}}$ для удовлетворения требований прочности, охлаждения, технологичности и др., не опасаясь ущерба для эффективности проектируемой турбины.

В решетках меньшей конфузурности характер влияния шага на потери от угла атаки становится близким к тому, что показали исследования решеток МЭИ. Например, в серии решеток № 38, 44 и 52 для $K_p = 2.4$, близких к периферийному сечению рабочего колеса турбины, при $\Delta\beta_1 > 0^\circ$ с ростом шага значение $\Delta\zeta$ увеличивается, но эта тенденция ослабляется с уменьшением $\Delta\beta_1$ и ростом λ_2 . При изменении шага \bar{t} от 0.8 (решетка № 44) до 0.97 (решетка № 52) при $\Delta\beta_1 = 10^\circ$ это увеличение $\Delta\zeta$ не превышает 0.02 при $\lambda_2 = 0.6$ и 0.01 при $\lambda_2 = 0.8$. При $\Delta\beta_1 = -10^\circ$ с ростом шага потери также увеличиваются, но уже несущественно (менее 0.005) (рис. 4).

Распределение скорости λ на профилях позволяет выявить причину роста $\Delta\zeta$ при увеличении шага. Из рис. 4 видно, что в решетке с $\bar{t} = 0.8$ при $\Delta\beta_1 = 20^\circ$ и $\lambda_2 = 0.8$ пик скорости вблизи входной кромки не наблюдается и скорость в этой области течения находится на уровне $\lambda = 0.6$. В решетке с шагом $\bar{t} = 0.97$ даже при $\Delta\beta_1 = 0^\circ$ уже есть небольшой пик скорости вблизи кромки, а при $\Delta\beta_1 = 20^\circ$ появляется сверхзвуковая скорость $\lambda = 1.05$ (рис. 5).

Отрицательные углы атаки ведут, как обычно, к улучшению условий обтекания входной части спинки. В частности, в решетке с $\bar{t} = 0.97$

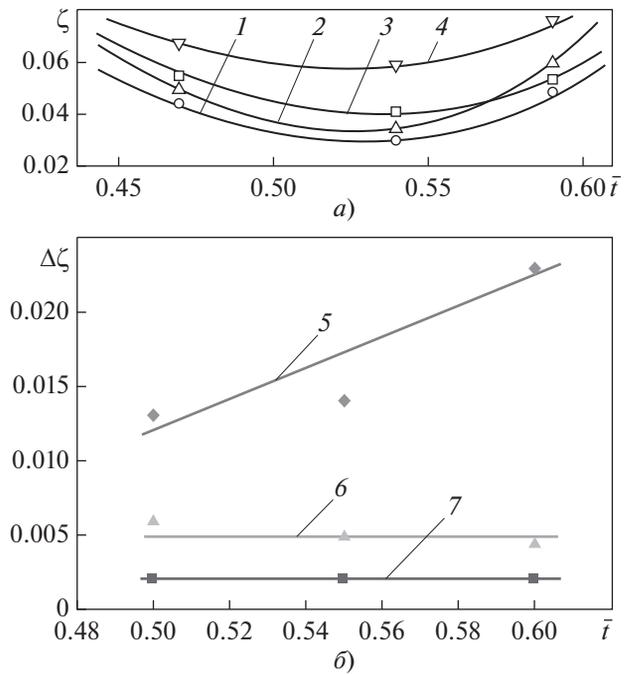


Рис. 2. Характеристики решеток P5033A [8] ($\beta_{1\text{к}} = 50^\circ$, $\beta_{2\text{эф}} = 32^\circ-34^\circ$, $\bar{c} = 0.2$, $\bar{d}_1 = 0.021$) при $\lambda_2 \approx 0.7$. а – профильные потери; б – потери от угла атаки при $\bar{t}_{\text{опт}} \approx 0.7$ [7]; β_1 , град: 1 – 50° ; 2 – 45° ; 3 – 60° ; 4 – 40° при $\Delta\beta_1$, равном 10° (5), 5° (6), -10° (7)

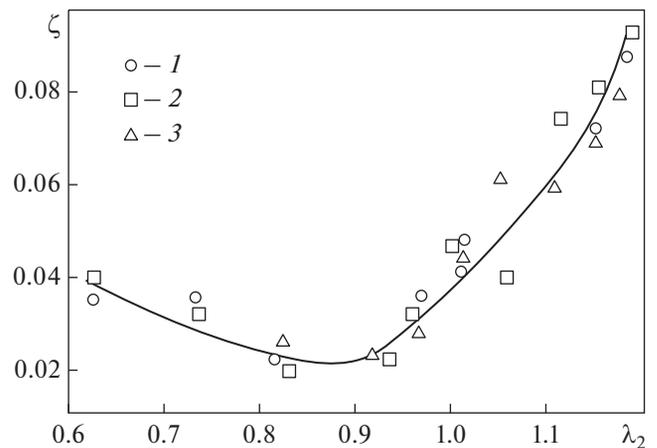


Рис. 3. Профильные потери в решетке № 12 для $\beta_{1\text{к}} = 98.7^\circ$, $\beta_{2\text{эф}} = 19.4^\circ$, $\bar{c} = 0.15$, $\bar{d}_1 = 0.11$ при $\lambda_2 \approx 0.7$. β_1 , град: 1 – 75° ; 2 – 90° ; 3 – 100° [9]

при $\Delta\beta_1 = -15^\circ$ пик скорости вблизи кромки исчезает (см. рис. 5).

Со снижением конфузурности решетки влияние шага на потери от угла атаки усиливается и это проявляется в больших значениях $\Delta\zeta$ и большем их изменении при изменении шага.

Следует отметить, что при исследовании всех решеток МЭИ и ЦИАМ при углах $\Delta\beta_1$ от -10° до

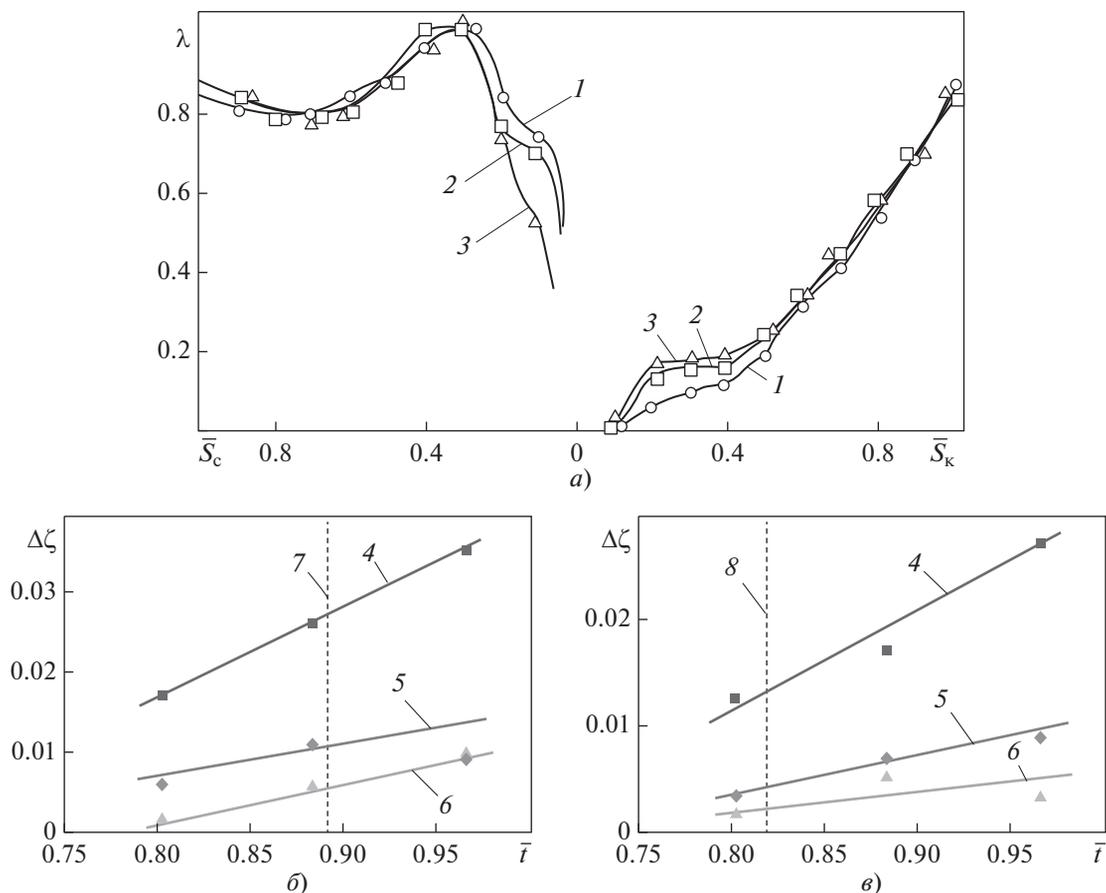


Рис. 4. Характеристики решеток серии для $\beta_1 \approx 86^\circ$, $\beta_2 \approx 25^\circ$ [9].

a – распределение скоростей по профилю № 44 для $\beta_{1к} = 87^\circ$, $\beta_{2эф} = 25^\circ$, $\bar{t} = 0.8$, $\bar{c} = 0.085$, $\bar{a}_1 = 0.045$ при $\lambda_2 \approx 0.8$; *b* – потери $\Delta\zeta$ при $\lambda_2 = 0.6$; *e* – потери $\Delta\zeta$ при $\lambda_2 = 0.8$; β_1 , град: 1 – 65; 2 – 85; 3 – 105 при $\Delta\beta_1$, равном 20° (4), 10° (5), -10° (6); 7 – $\bar{t}_{опт}$ [7]; 8 – $\bar{t}_{опт}$

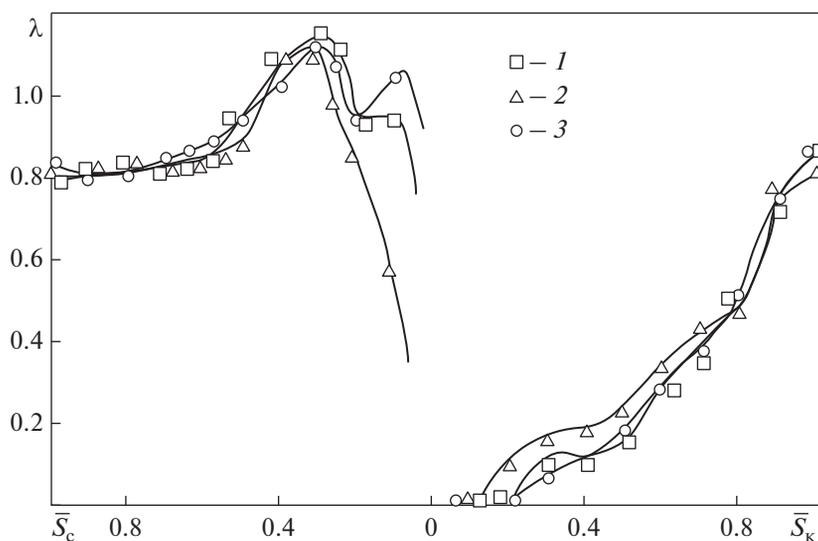


Рис. 5. Распределение скоростей по профилю № 52 [9] для $\beta_{1к} = 84^\circ$, $\beta_{2эф} = 25^\circ$, $\bar{c} = 0.08$, $\bar{a}_1 = 0.046$ при $\lambda_2 \approx 0.8$. β_1 , град: 1 – 85; 2 – 105; 3 – 65

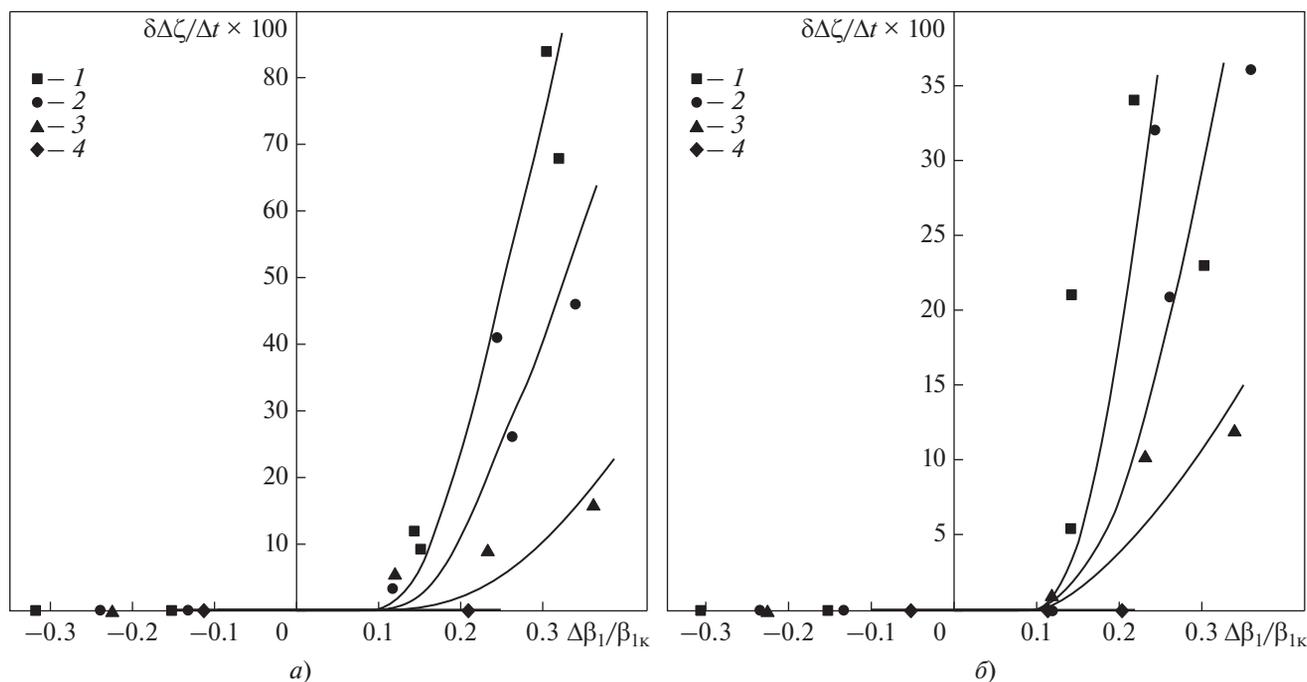


Рис. 6. Зависимость относительного изменения потерь от угла атаки при $\lambda_2 = 0.6$ (а) и $\lambda_2 = 0.8$ (б).

K_p : 1 – 1.35; 2 – 1.75; 3 – 2.40; 4 – 3.00

5° потери $\Delta\zeta$ были невелики (менее 0.005) и практически не зависели от шага. В таком случае в проектном и поверочном расчетах турбины профильные потери в решетке могут быть приняты как ζ_0 без заметной погрешности.

По результатам экспериментов при $\Delta\beta_1 \geq 0^\circ$ были обобщены данные об изменениях потерь $\delta\Delta\zeta$ при варьировании $\Delta\bar{t}$. При этом следует заметить, что в обследованных сериях решеток среднее значение диапазона $\Delta\bar{t}$ составляло около 25%, а отклонение шага \bar{t} от значения $\bar{t}_{\text{опт}}$ было равно $\pm 10\%$ при $\lambda_2 = 0.6$ и $\pm 15\%$ при $\lambda_2 = 0.8$.

Анализ результатов экспериментов показал, что для всех решеток исходные зависимости $\Delta\zeta(\bar{t})$ можно принять линейными во всем диапазоне изменения шага (см. рис. 2, 4, 6). Это важное обстоятельство, которое позволяет упростить решение задачи о нахождении зависимости изменения потерь от изменения шага. Действительно, в таком случае относительное изменение потерь $\delta\Delta\zeta(\Delta\bar{t})$ не зависит от самого шага, а является функцией K_p , $\Delta\beta_1$ и λ_2 . Итоговая зависимость для $\delta\Delta\zeta/\Delta\bar{t}$ в функции относительного угла атаки $\Delta\beta_1/\beta_{1k}$ при разных значениях K_p и λ_2 показана на рис. 6. Она соответствует описанному характеру влияния шага на изменение коэффициента потерь $\Delta\zeta$.

Чтобы оценить пригодность данных о влиянии шага для использования при проектировании, было выполнено специальное расчетное исследо-

вание. Оно заключалось в том, что при заданных значениях $b, c, d_1, d_2, \beta_{2\text{эф}}, \beta_1$ и λ_2 сравнивали потери в решетках с разным шагом, но неизменным профилем (как в эксперименте) с потерями в решетках с разным шагом, каждая из которых была из лучших по возможности профилей (как при реальном проектировании). Расчеты вязкого потока в решетках при $\lambda_2 = 0.6-0.9$ выполняли по методике [10]. (Проектирование и расчеты решеток проводил В.Л. Мурашко, ведущий специалист КБ им. А. Люльки.)

Далее рассмотрены результаты исследований решеток ЦИАМ [9] с неизменным профилем: серия сопловых решеток № 2, 12, 23, 30 и серия рабочих решеток № 136, 140, 147 с $K_p = 1.8$. При этом решетки № 12 с шагом $\bar{t} = 0.81$ и № 136 с $\bar{t} = 0.73$ входили и в серии, спроектированные с решетками разного профиля.

Расчитанные и экспериментальные значения потерь в сопловых решетках были близки. В частности, при $\Delta\beta_1 = 0$ и $\lambda_2 = 0.8$ с увеличением шага расчетный коэффициент потерь ζ_0 уменьшался от 0.06 до 0.025, а экспериментальный — от 0.055 до 0.028. Расчетные потери от угла атаки $\Delta\zeta$ во всех решетках при $\Delta\beta_1 < 0$ были отрицательными и не превышали 0.001, а при $\Delta\beta_1 = 15^\circ$ составляли не более 0.004. Вдобавок в обеих сериях при $\Delta\beta_1 = 0^\circ-15^\circ$ во всем обследованном диапазоне значений шага расчетное изменение потерь $\delta\Delta\zeta$ было практически нулевым.

Как уже указывалось, $\Delta\zeta \approx 0$ в эксперименте при изменении $\Delta\beta_1$ от -15° до 15° (см. рис. 3). Все это означает, что полученные из экспериментов данные о влиянии шага на потери от угла атаки вполне могут быть использованы и при проектировании решеток.

Расчетные профильные потери в рабочих решетках ζ_0 были близки к экспериментальным значениям. Так, в решетке № 140 расчетный коэффициент потерь равен 0.048 при $\lambda_2 = 0.6$ и 0.045 при $\lambda_2 = 0.8$, а экспериментальные значения ζ_0 равны соответственно 0.049 и 0.042 [9]. Данные расчета потерь от угла атаки $\Delta\zeta$ также совпадают с экспериментальными: при $\Delta\beta_1 = -10^\circ$ потери близки к нулю, при $\Delta\beta_1 > 0^\circ$ увеличение \bar{t} и уменьшение λ_2 ведет к росту $\Delta\zeta$. Однако расчетные значения $\Delta\zeta$ получились меньше экспериментальных.

В серии с разными профилями, как и следовало ожидать, удалось построить более эффективные решетки при $\Delta\beta_1 = 0^\circ$. Например, по расчету при $\lambda_2 = 0.8$ и $\bar{t} = 0.69$ новая решетка имела $\zeta_0 = 0.042$, что немного меньше, чем в решетке № 140 с тем же шагом. По-видимому, поэтому во всем диапазоне изменения шага изменение потерь $\Delta\zeta$ было чуть меньше, чем в серии с неизменным профилем.

В итоге, можно заключить, что при конфузурности решетки $K_p \leq 1.8$ влияние шага на потери $\Delta\zeta$ может быть принято несколько меньшим при проектировании. Очевидно, чтобы уточнить это положение, требуются дополнительные тщательно спланированные исследования. Вместе с тем, понятно, что зависимость, представленная на рис. 6, в первом приближении также может быть пригодна для использования при проектировании.

Следует заметить, что приведенные в [7] рекомендации по выбору оптимального конструктивного угла входа $\beta_{\text{ик}}^{\text{опт}}$ в проектируемой решетке получены с использованием для оценки $\Delta\zeta$ зависимости из [3], в которой не учитывается влияние \bar{t} и λ_2 . Поскольку установлено, что при $\Delta\beta_1 > 0^\circ$ уменьшение шага приводит к снижению потерь $\Delta\zeta$, повышение густоты решетки может вести к увеличению оптимального угла $\beta_{\text{ик}}^{\text{опт}}$. Этот вопрос также подлежит исследованию.

Так, согласно [7] для проектируемой решетки на углы $\beta_1 = 50^\circ$, $\beta_2 = 25^\circ$ и $K = 1.8$ при $\lambda_2 = 0.8$ и $\bar{t}_{\text{опт}} = 0.74$ значение угла $\beta_{\text{ик}}^{\text{опт}} \approx 57^\circ$. При выборе варианта с меньшим на 10% шагом $\bar{t} = 0.67$ значение $\delta\Delta\zeta/\Delta\bar{t}$ по зависимости на рис. 6, б снижается на 10% и значения $\Delta\zeta$ также уменьшаются на 10%, а угол $\beta_{\text{ик}}^{\text{опт}}$ соответственно увеличивается до 61° . Если решетку спроектировать с шагом $\bar{t} = 0.81$, то в соответствии с рис. 6, б значение $\delta\Delta\zeta/\Delta\bar{t}$ и потери $\Delta\zeta$ вырастут на 10%, а оптимальное значение $\beta_{\text{ик}}^{\text{опт}}$ уменьшится до 52° .

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов большого числа экспериментов с турбинными решетками при $\lambda_2 = 0.6-0.9$ и углах атаки от -20° до 20° позволил установить характер влияния изменения шага решетки в пределах около 25% на потери от угла атаки и найти зависимость для оценки изменения этих потерь при варьировании шага.
2. В диапазоне углов атаки от -20° до 5° можно принять, что потери $\Delta\zeta$ не зависят от шага.
3. При углах атаки более 5° увеличение шага ведет к росту потерь $\Delta\zeta$ со снижением конфузурности решетки и скорости выхода потока. Этот рост объясняется ухудшением обтекания входного участка спинки профиля, где появляется (или повышается) пик скорости и увеличивается интенсивность последующего торможения потока.
4. Полученную графическую зависимость потерь $\Delta\zeta$ от изменения шага можно рекомендовать в первом приближении для оценки профильных потерь в заданной решетке, а также для уточнения значения оптимального конструктивного угла входа в проектируемой решетке турбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копелев С.З.** Проектирование проточной части турбин авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1984.
2. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. **Степанов Г.Ю.** Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962.
4. **Monstapha S.H., Kasker S.C., Tremblay B.** An improved incidence losses prediction method for turbine airfoils // J. Turbomach. 1990. V. 112. Is. 2. P. 267–276. <https://doi.org/10.1115/1.2927647>
5. **Хомылев С.А., Резник С.Б., Ершов С.В.** Численное исследование обтекания турбинных решеток профилей. Ч. 1: Верификация расчетного метода // Вестник Харьков. политехн. ин-та. 2008. С. 3–12.
6. **Венедиктов В.Д.** Газодинамика охлаждаемых турбин. М.: Машиностроение, 1990.
7. **Аронов Б.М., Жуковский М.И., Журавлев В.А.** Профилирование лопаток авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение, 1978.
8. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я.** Атлас профилей решеток осевых турбомашин. М.: Машиностроение, 1965.
9. **Атлас** экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин / В.Д. Венедиктов, А.В. Грановский, А.М. Карелин, А.Н. Колесов, М.Х. Мухтаров. М.: ЦИАМ, 1990.
10. **Курманов Б.И., Подвидз Г.Л.** Расчет течения в решетках турбомашин на основе уравнений Навье–Стокса с использованием математической модели турбулентности ($q-\omega$) // Уч. зап. ЦАГИ. 2001. Т. XXXII. № 3–4. С. 81–95.

The Effect of Turbine Cascade Pitch on the Incidence Losses

B. I. Mamaev^{a, *}, S. A. Poluboyarino^{a, **}, and A. V. Starodumov^{a, *}**

^a Lyulka Design Bureau, Branch of PAO ODK-UMPO, Moscow, 129301 Russia

*e-mail: boris.mamaev35@mail.ru

**e-mail: poluboyarino_{sa}@okb.umpo.ru

***e-mail: andrey.starodumov@okb.umpo.ru

Abstract—The results from studies of flat subsonic and transonic cascades with the convergence ratio $C_r = 1.2-3.1$ are considered. Series with three to four cascades in each with the same airfoil profile and different relative pitches were studied: nine series with a constant blade setting angle and eleven series with a constant effective outlet angle $\beta_{2\text{eff}}$. The pitch variation range in the series was approximately 25% with values larger and smaller than the optimal one. The cascades were mainly tested with the incidence angle $\Delta\beta_1$ from -20° to 20° and flow outlet velocity $\lambda_2 \approx 0.6-0.9$. The experiments have shown that, for cascades with a large convergence ratio $C_r \geq 2.9$, the energy loss coefficient in the cascade $\Delta\zeta = 0$ and remains unchanged in varying the pitch and with all of the studied values of $\Delta\beta_1$ and λ_2 . In cascades with a smaller convergence ratio, with negative $\Delta\beta_1$ and positive $\Delta\beta_1 \leq 5^\circ$, it can be taken that the value of $\Delta\zeta$ does not depend on the pitch. With $\Delta\beta_1 > 5^\circ$, increasing the pitch results in a growth of $\Delta\zeta$ with decreasing the cascade convergence ratio and flow outlet velocity. The growth of losses is attributed to poorer streamlining of the airfoil profile suction side inlet section, in which the velocity peak increases. An analysis of losses has shown that the dependences $\Delta\zeta(\bar{\tau})$ in the series can be taken to be linear. This made it possible to obtain a generalized dependence for the relative change of losses in varying the pitch as a function of C_r , $\Delta\beta_1$, and λ_2 . A study in which two cascade series with different pitches and the same airfoil profile and with airfoil profiles specially constructed for each pitch were compared using viscous flow numerical analyses for different specified flow conditions has shown that the influence of pitch on the incidence losses that has been revealed in the course of experiments can also be used in optimizing the cascades.

Keywords: turbine cascade, cascade airfoil profile, convergence ratio, relative pitch, incidence angle, streamlining, losses, energy loss coefficient, wind tunnel test, channel convergence ratio