

---

---

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

---

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБИННЫХ РЕШЕТОК  
ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ УГЛАХ АТАКИ**

© 2023 г. Б. И. Мамаев<sup>а</sup>, Г. В. Ермолаев<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>ОКБ им. А. Льюльки – филиал ПАО ОДК УМПО, ул. Касаткина, д. 13, Москва, 129301 Россия

\*e-mail: ermolaev\_grigory@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.2022 г.

После доработки 15.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

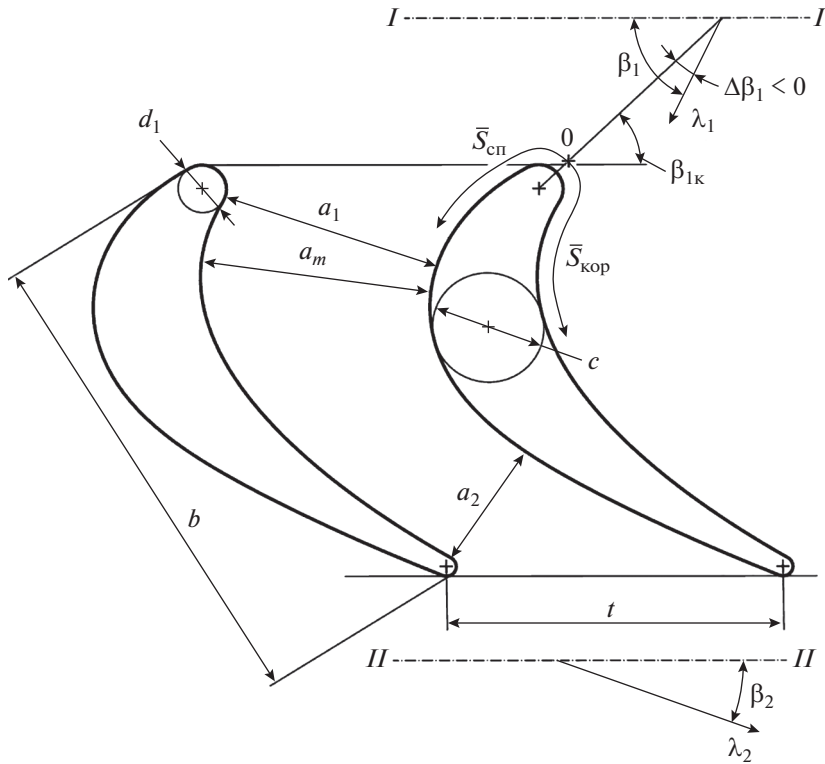
На основании анализа экспериментальных данных уточнены влияние угла атаки на обтекание и профильные потери энергии (далее потери) в плоских турбинных решетках осевых турбин. Охвачены широкие диапазоны геометрических и режимных параметров до- и трансзвуковых решеток. Показано, что отрицательный угол атаки по влиянию на потери – явление более сложное, чем положительный. В диапазоне его умеренных значений, когда еще не возник высокий пик скорости на корыте профиля около входной кромки, улучшение обтекания спинки может пересиливать ухудшение обтекания корыта и потери от угла атаки могут стать отрицательными. Большинство решеток имеют диапазон таких отрицательных углов атаки, в котором потери от угла атаки равны нулю или сначала снижаются, достигая отрицательного минимума, а затем начинают расти. С повышением конфузурности решетки ширина этого диапазона увеличивается, а потери уменьшаются. Как правило, отрицательные потери от угла атаки обнаруживаются в решетках, в которых при расчетном натекании имеется пик скорости на спинке вблизи кромки. Если решетка с пониженной конфузурностью и значительной местной диффузурностью канала имеет на корыте высокий пик скорости вблизи входной кромки, то появление отрицательного угла атаки ведет к увеличению потерь. Для расчета потерь от угла атаки целесообразно разделить решетки на группы в зависимости от характера изменения потерь по углу атаки и установить общие для каждой группы диапазоны значений основных геометрических параметров решеток.

*Ключевые слова:* решетка, корыто, входная кромка, степень конфузурности, отрицательный угол атаки, скорость выхода потока, обтекание, пик скорости, диффузурность канала, профильные потери

**DOI:** 10.56304/S0040363623030037

При изменении условий работы турбины меняются режимные параметры ее решеток (рис. 1). Параметры  $\Delta\beta_1$  и  $\lambda_2$  во многом определяют коэффициент полезного действия и расходные характеристики турбины. По обыкновению углы  $\Delta\beta_1 > 0$  связаны с высокими (нагруженными) режимами работы турбины, а  $\Delta\beta_1 < 0$  – с пониженными (частичными). Отрицательным углам атаки на практике уделяется меньше внимания, чем положительным. Это объясняется, прежде всего, тем, что углы  $\Delta\beta_1 < 0$  не так сильно влияют на характеристики решеток, а частичные режимы работы, как нередко считается, мало сказываются на экономичности газотурбинной установки. В итоге, в настоящее время отсутствуют не только обоснованные методы газодинамического расчета турбинных ступеней, но и данные исследований детальной картины течения в них при работе в глубоких частичных режимах с отрицательными углами атаки.

Надежного теоретического решения сложной задачи о влиянии угла  $\Delta\beta_1$  на газодинамические характеристики решетки нет. Поэтому на практике для оценки коэффициента потерь от угла атаки  $\Delta\zeta = \zeta - \zeta_0$  (здесь  $\zeta$  – коэффициент потерь при произвольном угле натекания,  $\zeta_0$  – коэффициент потерь при расчетном натекании  $\Delta\beta_1 = 0$ ) используются эмпирические зависимости. Но они часто дают очень разные значения профильных потерь для одной и той же решетки, а иногда и физически неверные результаты, в частности  $\Delta\zeta > 1$ . Экспериментальные данные при  $\Delta\beta_1 < 0$  обобщаются хуже, чем при  $\Delta\beta_1 > 0$ , и экспериментов мало, особенно при больших отрицательных углах атаки. Вместе с тем результаты газодинамического расчета турбины необходимы в режимах работы с изменением ее относительной мощности от нуля до единицы.



**Рис. 1.** Решетка турбинных профилей.

$b$  – хорда;  $t$  – шаг;  $\bar{t} = t/b$  – относительный шаг;  $c$  – толщина профиля;  $\bar{c} = c/b$  – относительная толщина профиля;  $d_1$  – толщина входной кромки;  $\bar{d}_1 = d_1/b$  – относительная толщина входной кромки профиля;  $a_1$  – ширина канала на входе;  $a_m$  – максимальная ширина канала;  $a_2$  – горловина;  $\bar{S}_{кор}$ ,  $\bar{S}_{сп}$  – относительные криволинейные координаты вдоль обводов корыта и спинки, отсчитываемые от середины дуги окружности входной кромки (точка 0);  $\beta_{1к}$  – конструктивный угол входа;  $\beta_{2эф} = \arcsin a_2/t$  – эффективный угол выхода;  $\beta_1$  – угол входа потока;  $\Delta\beta_1 = \beta_{1к} - \beta_1$  – угол атаки;  $\beta_2$  – угол выхода потока;  $\lambda_1$  – приведенная скорость потока на входе;  $\lambda_2$  – приведенная адиабатическая скорость выхода потока;  $I-I$ ,  $II-II$  – сечения до решетки и после нее

В настоящей статье на основе анализа результатов многочисленных экспериментов предпринята попытка уточнить влияние угла  $\Delta\beta_1 < 0$  на распределение отношения скоростей  $\lambda/\lambda_2$  вдоль обвода профиля (обтекание) (здесь  $\lambda$  – местная скорость на профиле) и профильные потери в решетках, а также найти рациональный подход к обобщению этого влияния и к разработке более точного метода оценки потерь от угла атаки.

### ПОДХОД К УТОЧНЕНИЮ ВЛИЯНИЯ УГЛА АТАКИ

В анализ были включены около 150 до- и трансзвуковых решеток паровых и газовых турбин, в основном из [1–4], при  $\beta_{1к} = 18-160^\circ$ ,  $\beta_{2эф} = 11.5-44^\circ$ ,  $\bar{t} = 0.39-1.05$ ,  $\bar{c} = 0.025-0.46$ ,  $\bar{d}_1 = 0.01-0.19$ ,  $\Delta\beta_1 = (-59)-54^\circ$ ,  $\lambda_2 = 0.2-1.0$ .

Коэффициент потерь  $\Delta\zeta$  является сложной функцией многих геометрических и режимных

параметров решетки. Из [1, 2, 5] в качестве определяющих можно выделить конфузурность решетки  $k = \sin \beta_{1к} / \sin \beta_{2эф}$ , величины  $\bar{c}$ ,  $\bar{t}$ ,  $\bar{d}_1$ ,  $\Delta\beta_1$  и  $\lambda_2$ . Конфузурность  $k$  – один из главных параметров, влияние которого практически заканчивается лишь при  $k > 1.7$  [5]. Поскольку влияние  $\bar{d}_1$  зависит главным образом от конфузурности решетки [6], его значение косвенно будет учитываться при изменении значения  $k$ . Есть и другие влияющие на потери факторы, но их влияние отмечено лишь в небольшом числе случаев. В частности, следует упомянуть местную входную диффузурность межпрофильного канала  $D_m = \frac{a_m}{a_1} - 1$ ,

значение которой рекомендуется принимать равным не более 0.05. Для большинства обследованных решеток эта рекомендация выполнена. Только у несколько решеток, имеющих сильно изогнутый профиль, более высокие значения  $D_m \leq 0.08$ .

С учетом этих соображений и результатов предварительного анализа экспериментов решетки были разделены на пять групп, различающихся между собой прежде всего по конфузорности и толщине профиля:

$\beta_{1к} = 80-100^\circ$ ,  $\bar{c} > 0.12$ ,  $k \geq 2.7$  (обычно сопловые решетки первых ступеней);

$\beta_{1к} < 80^\circ$ ,  $\bar{c} \geq 0.12$  (средние сечения сопловых и рабочих венцов многих ступеней);

$\beta_{1к} \geq 70^\circ$ ,  $\bar{c} < 0.12$  (решетки любой конфузорности из тонких профилей, как правило, периферийные сечения рабочих венцов);

$\beta_{1к} < 70^\circ$ ,  $\bar{c} < 0.12$  (решетки из тонких профилей, периферийные сечения высоконагруженных рабочих венцов);

$k = 1.0-1.4$  (из профилей толщиной  $\bar{c} \geq 0.26$ , втулочные сечения рабочих колес).

Очевидно, это разделение должно уменьшить в группах разброс в характере зависимости  $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$  и облегчить установление общих закономерностей для потерь. Следует также заметить, что в расчетах турбин по среднему диаметру используются в основном решетки первых двух групп.

#### ХАРАКТЕР ВЛИЯНИЯ УГЛА АТАКИ

Известно [1, 5, 7], что угол атаки изменяет обтекание главным образом входной части решетки. Эти изменения заканчиваются на спинке до горла канала, а на корыте – в первой половине его контура (рис. 2, а). Положительный угол атаки ведет к ухудшению обтекания спинки, где скорости выше, чем на корыте (на его входном участке скорости даже ниже, чем скорость на входе в решетку). На спинке часто уже при  $\Delta\beta_1 = 0$  есть пик скорости – резкое повышение скорости до локального максимума с последующим сильным торможением потока (на графике выглядит как пик). При  $\Delta\beta_1 > 0$  этот пик растет и его диффузорный участок интенсифицируется. При этом обтекание корыта становится благоприятнее, чем при  $\Delta\beta_1 = 0$ . При отрицательном угле атаки улучшается обтекание со стороны спинки, где может исчезнуть пик скорости около кромки. На корыте течение ухудшается и могут появиться пик скорости и отрыв потока с корыта, который, впрочем, до выходной кромки не распространяется [7].

Расчет и опыт исследования характеристик турбин показывают, что при углах атаки изменения течения со стороны спинки оказывают более сильное влияние на потери, чем изменения со стороны корыта. Именно поэтому характер влияния положительного угла атаки неизменный: даже при малых его значениях улучшения течения со стороны корыта не могут пересилить ухудше-

ний на спинке и коэффициент  $\Delta\zeta > 0$ . Отрицательный угол атаки – явление более сложное по влиянию на потери. Действительно, при умеренных его значениях, когда еще не возник высокий пик скорости на корыте, улучшение структуры потока со стороны спинки может пересилить влияние изменений на корыте и значение коэффициента  $\Delta\zeta$  может стать отрицательным в некотором диапазоне изменения  $\Delta\beta_1$ . Только за грани-

цами этого диапазона, при больших значениях  $\Delta\beta_1 < 0$ , когда усиливаются диффузорные эффекты на корыте,  $\Delta\zeta > 0$ , но с ростом угла атаки  $\Delta\zeta$  увеличивается не так быстро, как при  $\Delta\beta_1 > 0$ .

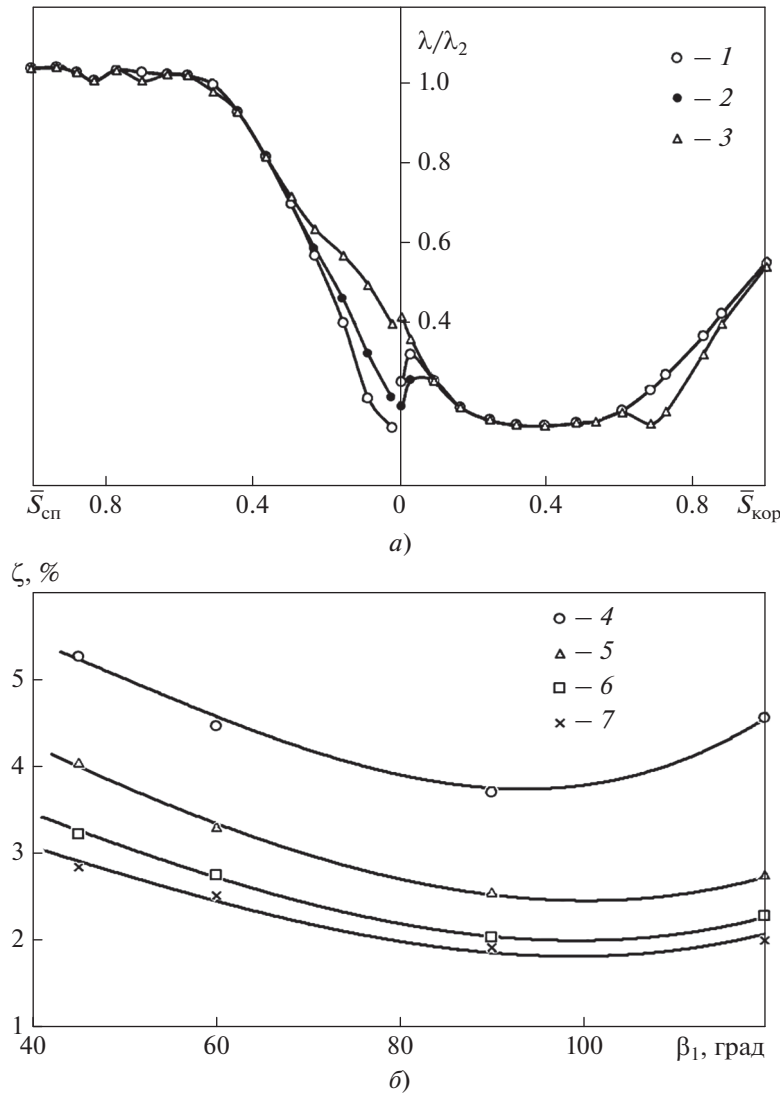
#### ПРИМЕРЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕШЕТОК

*Решетки с углом  $\beta_{1к} = 80-100^\circ$ ,  $\bar{c} > 0.12$*

Решетка С-9012А с углом  $\beta_{1к} = 90^\circ$ ,  $\beta_{2эф} \approx 12^\circ$ ,  $\bar{c} = 0.23$ ,  $\bar{t} = 0.75$  и  $\bar{d} = 0.11$  из атласа МЭИ [2] имеет очень высокую конфузорность  $k = 4.8$ . Эта геометрическая конфузорность тесно связана с конфузорностью потока  $k_{п} = \sin\beta_1/\sin\beta_2$ , которая, по сути, и определяет эпюру скоростей  $\lambda(\bar{S})$  (здесь  $\bar{S}$  – относительная криволинейная координата вдоль обводов профиля) и коэффициент профильных потерь  $\zeta$  при разных значениях  $\Delta\beta_1$ . В этой решетке значение  $k_{п}$  не сильно меняется при большом изменении угла атаки:  $k_{п} > 4$  даже при  $\Delta\beta_1 = \pm 30^\circ$ . Это свойство помогает обеспечивать конструктивные и технологические требования благодаря изменению конструктивного угла входа без ухудшения аэродинамической эффективности проектируемой решетки.

В высококонфузорной решетке вблизи входной кромки уровень скоростей мал ( $\lambda < 0.1$  при  $\lambda_2 \approx 0.5$ ), а характер обтекания при  $\Delta\beta_1 = 0$  благоприятный (без больших пиков скорости у кромки и последующих интенсивных диффузорных участков) и меняется слабо при изменении угла атаки (см. рис. 2, а). Согласно [7] обтекание спинки может сохраняться безотрывным даже при больших отрицательных углах атаки. Поэтому при  $\Delta\beta_1 = 0$  коэффициент потерь  $\zeta_0$  небольшой и существует широкий диапазон углов  $\Delta\beta_1 \neq 0$ , в котором  $\Delta\zeta = 0$ . На рис. 2, б видно, что при  $\lambda_2 \approx 0.8$  значение  $\zeta_0 < 0.02$  и оно неизменно в диапазоне углов  $\Delta\beta_1$  от 0 до  $-30^\circ$ .

Аналогичные результаты показывают решетки с  $\beta_{1к} = 90-94^\circ$  ТН-1 и ТН-2 из [1] и № 27 и 30 из [3]. В частности, решетка ТН-1 с  $\beta_{1к} = 90^\circ$ ,  $\bar{c} = 0.18$ ,  $\beta_{2эф} = 12^\circ$ ,  $\bar{t} = 0.75$  и  $\bar{d}_1 = 0.07$  при  $\lambda_2 = 0.33$  и



**Рис. 2.** Зависимость  $\lambda/\lambda_2$  от относительных криволинейных координат при  $\lambda_2 = 0.53$  (а) и коэффициента потерь  $\zeta$  от угла входа потока (б) в решетке С-9012А.

$\beta_1$ , град: 1 – 120; 2 – 90; 3 – 60;  $\lambda_2$ : 4 – 0.22; 5 – 0.43; 6 – 0.64; 7 – 0.83

углах  $\Delta\beta_1$  от  $-50$  до  $30^\circ$  имеет неизменно низкое значение  $\zeta \approx 0.027$  и постоянный угол потока  $\beta_2 \approx 12.7^\circ$ .

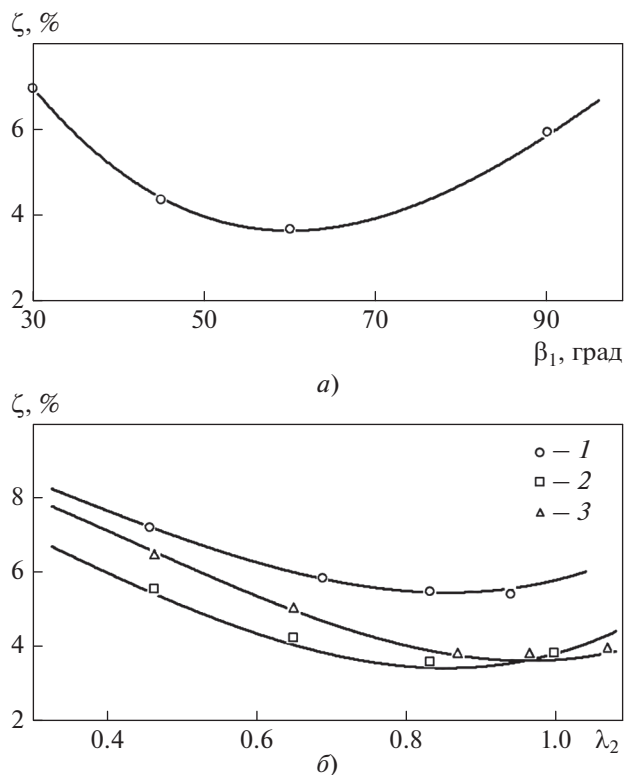
*Решетки с углом  $\beta_{лк} < 80^\circ$  и  $\bar{c} \geq 0.12$*

Несколько примеров соответствующих сопловых решеток с углами  $\beta_{лк} = 45-65^\circ$ ,  $\beta_{2\phi} = 13-30^\circ$  и шагом  $\bar{t} = 0.5-0.82$  встречаются в атласе [2]. Они имеют довольно высокую конфузурность  $k = 1.7-2.7$ .

Тенденция изменения характеристик указанных решеток такая же, как для решетки С-5520А ( $\beta_{лк} \approx 60^\circ$ ,  $\beta_{2\phi} \approx 23^\circ$ ,  $\bar{c} \approx 0.2$ ,  $\bar{t} = 0.53$ ,  $\bar{d}_1 = 0.025$  и  $k = 2.2$ ). Видно (рис. 3, а), что при  $\lambda_2 \approx 0.7$  суще-

ствует диапазон угла  $\Delta\beta_1$  от 0 до  $-10^\circ$ , в котором  $\Delta\zeta \approx 0$  (в некоторых решетках потери становятся чуть меньше нулевых). Этот диапазон сужается, и за его пределами потери растут более интенсивно в решетках с меньшей конфузурностью  $k$  и при снижении  $\lambda_2$ . При более высоких (по модулю) углах атаки коэффициент  $\Delta\zeta$  увеличивается, но даже при  $\Delta\beta_1 = -30^\circ$  и  $\lambda_2 = 0.9$  он не превышает 0.02 (рис. 3, б).

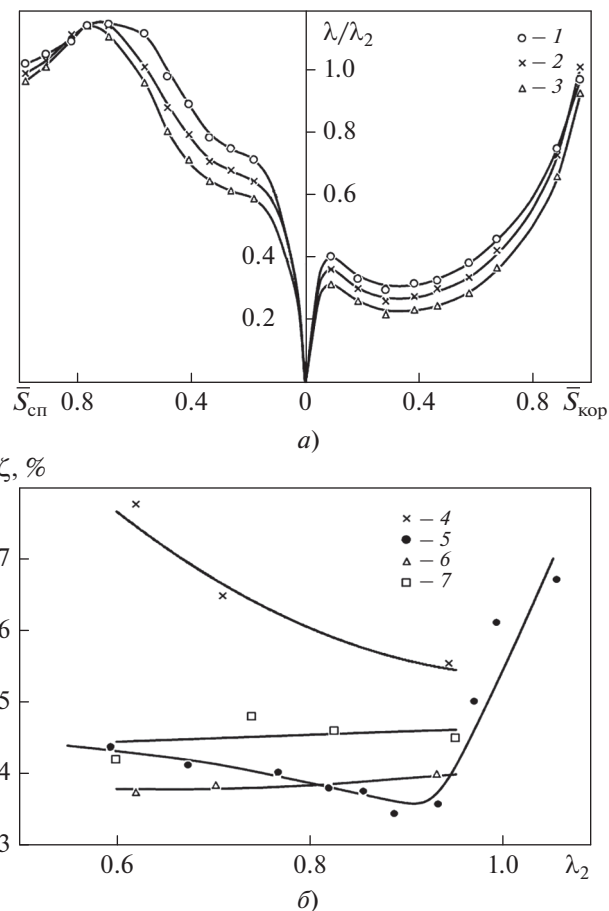
Решетка № 136 с  $\beta_{лк} \approx 42^\circ$ ,  $\beta_{2\phi} \approx 22^\circ$ ,  $\bar{t} \approx 0.7$ ,  $\bar{c} \approx 0.25$  и  $k \approx 1.8$  при  $\Delta\beta_1 = 0$  имеет удовлетворительное обтекание без пика скорости на спинке и небольшую скорость на корыте вблизи входной кромки ( $\lambda < 0.3$  при  $\lambda_2 \approx 0.8$ ) [3]. В ней, как в лю-



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента потерь  $\zeta$  от  $\beta_1$  при  $\lambda_2 \approx 0.7$  (а) и от  $\lambda_2$  (б) в решетке С-5520А.  $\beta_1$ , град: 1 – 90; 2 – 60; 3 – 45

бой конфузурной решетке, вследствие сжимаемости потока скорости течения в канале и максимальная скорость на спинке  $\lambda_{\max}$  растут медленнее, чем скорость выхода  $\lambda_2$  (рис. 4, а). В результате с ростом  $\lambda_2$  снижается степень выходной диффузорности  $D_e = (\lambda_{\max} - \lambda_2)/\lambda_2$  – фактора, который, в основном, и определяет профильные потери [8]. Именно вследствие уменьшения  $D_e$  и увеличения ускорения потока на конфузурных участках обтекания потери снижаются с ростом  $\lambda_2$ . На рис. 4, б видно, что при  $\Delta\beta_1 \approx 0$  потери достигают минимума  $\zeta_0 = 0.04$  при  $\lambda_2 \approx 0.9$ . При больших  $\lambda_2$  на профиле возникают сверхзвуковые скорости, что ведет к кризисному возрастанию потерь.

При заданном значении  $\lambda_2$  чем выше конфузурность решетки, тем ниже уровень скоростей в ее канале, благоприятнее их распределение на профиле и меньше значение  $D_e$ . Как было отмечено ранее, рост  $\lambda_2$  усиливает эти преимущества. Поэтому в более конфузурной решетке с ростом скорости  $\lambda_2$ , когда конфузурность потока дополнительно повышается из-за уменьшения угла выхода  $\beta_2$ , профильные потери менее резко снижаются и положение линий  $\zeta(\lambda_2)$  на графике, как правило, более пологое.



**Рис. 4.** Зависимость  $\lambda/\lambda_2$  от относительных криволинейных координат при  $\beta_1 = 40^\circ$  (а) и коэффициента потерь  $\zeta$  от  $\lambda_2$  (б) в решетке № 136.

$\lambda_2$ : 1 – 0.7; 2 – 0.8; 3 – 0.9;  $\beta_1$ , град: 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50; 7 – 60

При  $\Delta\beta_1 < 0$  с ростом  $\lambda_2$  потери от угла атаки непрерывно увеличиваются. При этом указанное меньшее снижение профильных потерь по сравнению с расчетным режимом при  $\Delta\beta_1 = 0$  приводит к интересным особенностям зависимости  $\zeta(\lambda_2)$  при разных значениях  $\Delta\beta_1$ . Когда при умеренных углах атаки и низких  $\lambda_2$  значение  $\Delta\zeta < 0$ , то с ростом  $\lambda_2$  отрицательные потери будут уменьшаться. Они могут достигнуть нуля при некотором значении  $\lambda_2$ , выше которого станут положительными и начнут увеличиваться, как в решетке № 136 при  $\lambda_2 > 0.8$  и  $\beta_1 = 50^\circ$  ( $\Delta\beta_1 = -7.5^\circ$ ). Если при большом угле атаки и низком значении  $\lambda_2$  коэффициент  $\Delta\zeta > 0$ , то рост  $\lambda_2$  приведет к непрерывному увеличению потерь от отрицательного угла атаки, как при  $\beta_1 = 90^\circ$  ( $\Delta\beta_1 = -30^\circ$ ) на рис. 3, а и при  $\beta_1 = 60^\circ$  ( $\Delta\beta_1 = -17.5^\circ$ ) на рис. 4, б.

При  $\Delta\beta_1 > 0$  решетка ведет себя как менее конфузурная, поэтому в ней при изменении  $\lambda_2$  профильные потери изменяются более резко, чем при  $\Delta\beta_1 = 0$ , и потери от угла атаки снижаются (см. рис. 3, б и 4, б). При умеренных углах атаки (обычно не более  $10\text{--}15^\circ$ ) рост  $\lambda_2$  приводит к такому снижению профильных потерь, что нередко при  $\lambda_2 = 0.8\text{--}0.9$  они сравниваются с потерями при безударном натекании. В таком случае  $\Delta\zeta = 0$ , как при  $\beta_1 = 45^\circ$  ( $\Delta\beta_1 = 15^\circ$ ) на рис. 3, б. Согласно экспериментам, значение  $\Delta\zeta \approx 0$  сохраняется и при дальнейшем повышении скорости  $\lambda_2$  [3].

Эксперименты показали [3], что в решетках с одинаковым профилем изменение шага  $\bar{t}$  в диапазоне от 0.7 (решетка № 136) до 0.8 (решетка № 154) не приводит к перемене характера зависимостей  $\zeta$  и  $\Delta\zeta$  от скорости  $\lambda_2$  и угла атаки  $\Delta\beta_1$ .

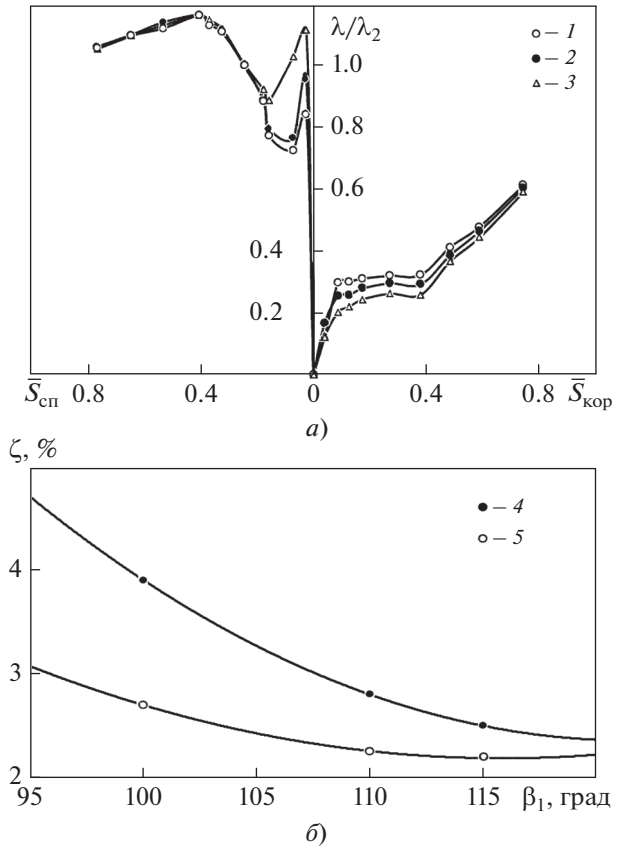
*Решетки из тонких профилей с  $\beta_{1к} \geq 70^\circ$  и  $\bar{c} < 0.12$*

Экспериментальные характеристики решетки Г1 ( $\beta_{1к} = 110^\circ$ ,  $\beta_{2эф} \approx 24.5^\circ$ ,  $\bar{t} \approx 0.83$ ,  $\bar{c} = 0.06$ ,  $\bar{d}_1 \approx 0.03$ ) высокой конфузурности  $k = 2.3$  с малым углом поворота потока  $\theta = 180^\circ - \beta_1 - \beta_2 \approx 45^\circ$  показаны на рис. 5 [9]. Обтекание решетки при  $\Delta\beta_1 = 0$  и  $\lambda_2 = 0.63$  удовлетворительное: на спинке наблюдаются небольшой пик скорости вблизи входной кромки ( $\lambda = 0.6$ ) и умеренное значение  $D_e = 0.16$ . На корыте уровень скорости вблизи входной кромки небольшой ( $\lambda < 0.2$ ) и поток непрерывно ускоряется до выходной кромки. Как результат, малые потери ( $\zeta_0 \approx 0.022$ ).

Как в любой конфузурной решетке, умеренный угол атаки слабо влияет на обтекание корыта и все изменения потерь связаны с изменениями обтекания спинки (см. рис. 5, а). Угол атаки  $\Delta\beta_1 = -5^\circ$ , немного уменьшающий конфузурность  $k_{п}$  и поворот потока, только слегка понижает пик скорости у входной кромки. Поэтому профильные потери почти не изменяются, т.е.  $\Delta\zeta \approx 0$  (см. рис. 5, б).

О решающем влиянии на потери изменений обтекания входного участка спинки свидетельствуют и результаты опытов при  $\Delta\beta_1 = 10^\circ$ . В этом случае, несмотря на рост конфузурности потока, повышение пика скорости у кромки ведет к увеличению  $\zeta$  и  $\Delta\zeta$  (см. рис. 5, б). Правда, это увеличение небольшое (менее 0.005 при  $\lambda_2 = 0.63$ ), как и следовало ожидать для высококонфузурной решетки.

Аналогичные результаты получены для подобных решеток в [4]: решетки № 1, 2 и 3 ( $\beta_{1к} = 123\text{--}149^\circ$ ,  $\beta_{2эф} \approx 18\text{--}20^\circ$ ,  $\bar{t} \approx 0.71\text{--}0.9$ ,  $\bar{c} = 0.025\text{--}0.060$ ,  $\bar{d}_1 = 0.017\text{--}0.025$  и  $k = 1.6\text{--}2.4$ ) были испытаны в



**Рис. 5.** Зависимость  $\lambda/\lambda_2$  от относительных криволинейных координат при  $\lambda_2 = 0.63$  (а) и коэффициента потерь  $\zeta$  от  $\beta_1$  (б) в решетке Г1.  
 $\beta_1$ , град: 1 – ( $-5^\circ$ ); 2 –  $0^\circ$ ; 3 –  $10^\circ$ ;  $\lambda_2 = 4 - 0.40$ ; 5 –  $0.63$

широком диапазоне  $\lambda_2$  от 0.6 до 1.5. При умеренном отрицательном угле атаки до  $-12^\circ$  во всем исследованном диапазоне  $\lambda_2$  значение  $\Delta\zeta \approx 0$ . В решетке № 3 с углом  $\beta_{1к} = 123^\circ$  при  $\lambda_2 = 1$  и  $\Delta\beta_1 = -22^\circ$  значение  $\Delta\zeta \approx 0$ , а при  $\Delta\beta_1 = -37^\circ$  коэффициент потерь  $\Delta\zeta \approx 0.02$ . Следует отметить, что в решетках № 1 и 2 с  $k \approx 1.6$  введение отрицательного угла атаки приводило к уменьшению значения  $k_{п}$  до 1.1. При этом снижение потерь с ростом  $\lambda_2$  становилось более резким по сравнению со случаем  $\Delta\beta_1 = 0$ , как и следовало ожидать для менее конфузурного потока.

Такие решетки, как № 38, 44, 52, 58 и 61 [3] с  $\beta_{1к} = 75\text{--}88^\circ$ ,  $\beta_{2эф} \approx 25\text{--}35^\circ$  и  $\bar{c} = 0.08\text{--}0.12$ , имеют конфузурность  $k = 1.7\text{--}2.4$  и часто встречаются на периферии неохлаждаемых рабочих лопаток. Каналы этих решеток практически не имеют местной диффузурности ( $D_m < 1\%$ ), и в них при  $\Delta\beta_1 = 0$  наблюдаются благоприятные распределения скоростей на профиле без пиков скорости вблизи кромки. В таком случае при отрицательном угле

атаки до  $20^\circ$  потери  $\Delta\zeta = 0$  (как в решетке Г1 с  $\beta_{\text{лк}} > 90^\circ$ ).

*Решетки из тонких профилей с  $\beta_{\text{лк}} < 70^\circ$  и  $\bar{c} < 0.12$*

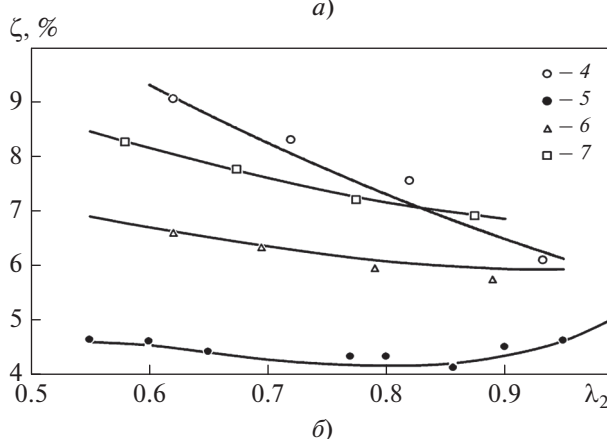
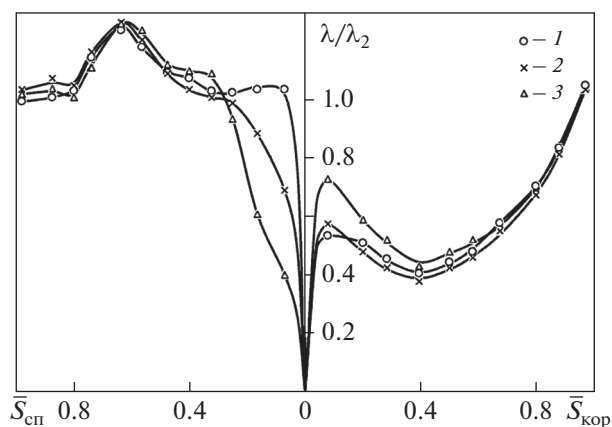
Примером таких решеток могут быть решетки № 77, 81, 92, 93 и 103 из [3] ( $\beta_{\text{лк}} = 48\text{--}56^\circ$ ,  $\beta_{2\text{эф}} = 26\text{--}32^\circ$ ,  $\bar{t} = 0.83\text{--}1.05$ ,  $\bar{c} = 0.082\text{--}0.093$ ,  $\bar{d}_1 = 0.063\text{--}0.071$  и  $k = 1.34\text{--}1.57$ ). Решетки имеют диффузорность  $D_M < 1.5\%$ , что естественно при тонких и сильно изогнутых профилях. При  $\Delta\beta_1 = 0$  вблизи кромки на спинке обнаруживается резкий пик скорости. Поэтому отрицательный угол атаки до  $-20^\circ$ , заметно улучшающий обтекание спинки и не сильно ухудшающий течение на корыте, показывает  $\Delta\zeta \leq 0$ , как для решеток второй группы с углом  $\beta_{\text{лк}} < 80^\circ$ .

*Решетки пониженной конфузорности  $k = 1.0\text{--}1.4$  из профилей толщиной  $\bar{c} \geq 0.26$*

Толстые профили ( $\bar{c} > 0.26$ ) – обычное явление для втулочных сечений рабочих лопаток. Конфузорность решеток этих сечений изменяется в широких пределах  $k = 1\text{--}2$  в зависимости от вероятности лопаточного венца, нагруженности и степени реактивности ступени [5].

Анализ экспериментальных данных показывает, что влияние отрицательного угла атаки, как обычно, зависит, прежде всего, от изменения обтекания спинки профиля. Если на ней вблизи кромки есть пик скорости, то умеренный угол атаки, устраняющий этот пик, приведет к  $\Delta\zeta < 0$ , если такого пика нет, то, скорее всего, следует ожидать  $\Delta\zeta \approx 0$  [3]. Однако если на корыте при  $\Delta\beta_1 = 0$  есть высокий пик скорости и за ним протяженный участок торможения потока, то угол  $\Delta\beta_1 < 0$ , расширяющий эту зону неблагоприятного течения, может привести к значению  $\Delta\zeta > 0$ . Это встречается преимущественно в решетках малой конфузорности. В них межпрофильный канал выполнен слабо сужающимся и часто со значительной местной диффузорностью, поэтому обширная зона нарушенного течения (как бы пузырь) может поджимать “здоровый” поток в канале [7] и увеличивать максимальную скорость на спинке, а тем самым увеличивать  $D_e$ . В таком случае появляется дополнительная причина для увеличения профильных потерь от угла атаки.

Менее конфузурная решетка № 160 ( $\beta_{\text{лк}} = 37^\circ$ ,  $\beta_{2\text{эф}} \approx 24.5^\circ$ ,  $\bar{t} \approx 0.66$ ,  $\bar{c} = 0.28$ ,  $\bar{d}_1 \approx 0.08$ ,  $D_M \approx 0.07$  и  $k = 1.45$ ) отличается от решетки № 136 главным образом обтеканием корыта [3]. При  $\Delta\beta_1 = 0$  и  $\lambda_2 \approx 0.8$  у входной кромки замечен пик скорости ( $\lambda \approx 0.5$ ) с последующим ее падением до  $\lambda \approx 0.3$  на участке до половины контура корыта (рис. 6, а).



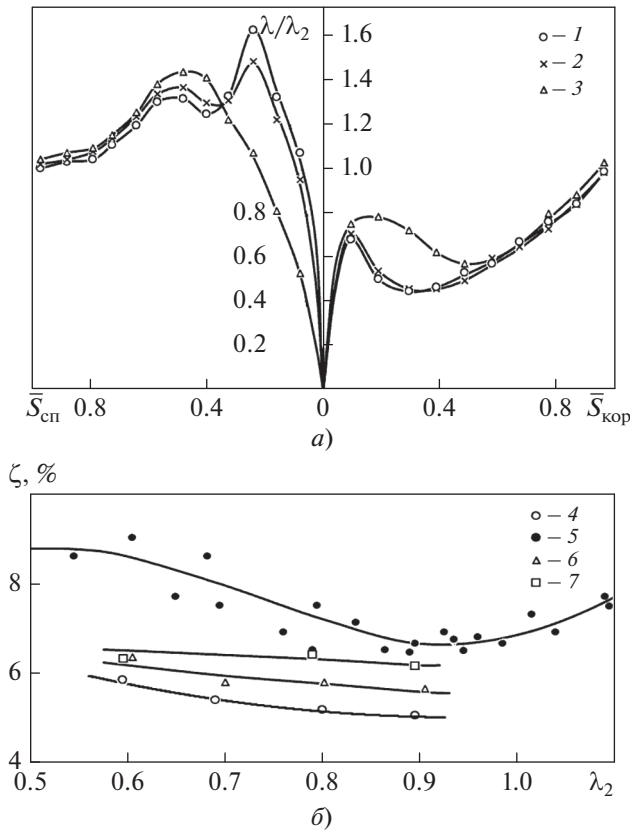
**Рис. 6.** Зависимость  $\lambda/\lambda_2$  от относительных криволинейных координат при  $\lambda_2 = 0.8$  (а) и коэффициента потерь  $\zeta$  от  $\lambda_2$  (б) в решетке № 160.

$\beta_1$ , град: 1 – 26; 2 – 35; 3 – 50; 4 – 30; 5 – 35; 6 – 45; 7 – 50

Потери в решетке невысокие ( $\zeta_0 \approx 0.04$ , рис. 6, б). Появление отрицательного угла атаки ведет к росту пика скорости на корыте и повышению интенсивности последующего торможения потока. Без сомнения, именно эти изменения на корыте являются основной причиной положительных потерь от угла атаки ( $\Delta\zeta \approx 0.02$  при  $\Delta\beta_1 = -8^\circ$  и  $\lambda_2 \approx 0.8$ , см. рис. 6, б).

Таким образом, эта решетка является тем редким случаем для умеренного отрицательного угла атаки, когда существенные ухудшения обтекания корыта пересиливают влияние небольших улучшений течения на спинке.

Активные решетки из сильно изогнутых профилей имеют каналы с высокой местной диффузорностью. Примером может быть решетка № 175 из атласа [3]:  $\beta_{\text{лк}} = 30.4^\circ$ ;  $\beta_{2\text{эф}} \approx 30.2^\circ$ ;  $\bar{t} \approx 0.73$ ,  $\bar{c} = 0.27$ ,  $\bar{d} \approx 0.09$ ,  $D_M \approx 0.08$  и  $k \approx 1$ . При  $\Delta\beta_1 = 0$  и  $\lambda_2 \approx 0.8$  обтекание решетки характеризуется наличием вблизи кромки высоких пиков скорости



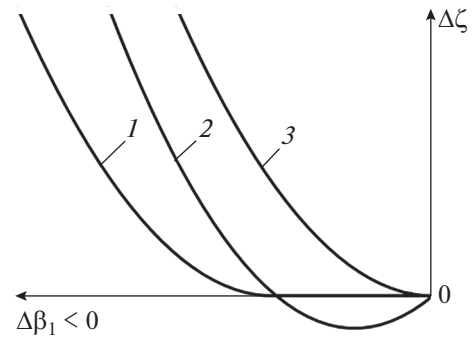
**Рис. 7.** Зависимость  $\lambda/\lambda_2$  от относительных криволинейных координат при  $\lambda_2 = 0.79$  (а) и коэффициента потерь  $\zeta$  от  $\lambda_2$  (б) в решетке № 175.  
 $\beta_1$ , град: 1 – 25; 2 – 30; 3 – 45; 4 – 30; 5 – 35; 6 – 40; 7 – 45

на спинке ( $\lambda = 1.2$ ) и на корыте ( $\lambda = 0.8$ ). Потери в такой решетке высокие:  $\zeta_0 \approx 0.07$  (рис. 7).

Даже небольшой отрицательный угол атаки  $-5^\circ$  может приводить к существенному уменьшению или даже устранению пика скорости на спинке. Это изменение, несмотря на увеличение пика на корыте, значительно снижает потери (примерно на 0.02 при  $\lambda_2 = 0.8$ , см. рис. 7, б). При увеличении угла атаки, когда благоприятный характер обтекания спинки сохраняется, начинает сказываться ухудшение обтекания корыта и потери  $\Delta\zeta$  растут, хотя их значения еще могут оставаться отрицательными. В результате потери  $\Delta\zeta$  по углу атаки меняются немонотонно (рис. 8).

Можно заключить, что характер изменения профильных потерь от угла атаки в активных решетках такой же, как в большинстве конфузورных рабочих решетках, только, в отличие от них, количественные изменения в потерях и распределении скорости на профиле больше.

Различия в обтекании решеток затрудняют получение надежной аналитической зависимости



**Рис. 8.** Общий характер зависимостей потерь от угла атаки.  
 1 – решетки с высокой конфузурностью; 2 – большинство решеток; 3 – решетки с малой конфузурностью

для расчета профильных потерь от угла атаки. Для успешного решения этой задачи необходима методика, в которой для каждого вида зависимости  $\Delta\zeta(\Delta\beta_1)$  будут, прежде всего, выделены группы решеток и в каждой определены общие значения их основных геометрических параметров. Затем расчет потерь в заданной решетке будет выполнен с учетом характеристик наиболее близких к ней решеток из подходящей группы. При разработке такой методики должны быть использованы не только обширные экспериментальные данные, но и возможности вычислительной техники.

### ВЫВОДЫ

1. Отрицательный угол атаки – более сложное явление, чем положительный, и характер зависимостей потерь от угла атаки разнообразный. При  $\Delta\beta_1 < 0$  отрицательное влияние нерасчетного натекания сопровождается при  $\beta_{лк} \leq 90^\circ$  повышением конфузурности течения – главным положительным изменением, которое при умеренных углах атаки оказывает решающее влияние на потери.

2. Большинство турбинных решеток имеют диапазон умеренных отрицательных углов атаки, в котором потери равны нулю или сначала снижаются, достигая отрицательного минимума, а затем начинают расти. Ширина этого диапазона увеличивается, а рост потерь снижается с повышением конфузурности решеток.

3. Как правило, отрицательные значения  $\Delta\zeta$  достигаются в решетках, в которых при  $\Delta\beta_1 = 0$  имеется пик скорости на спинке вблизи входной кромки.

4. Если при расчетном натекании решетка с пониженной конфузурностью и повышенной местной диффузурностью канала имеет на коры-



те высокий пик скорости вблизи кромки с интенсивным диффузорным течением, то отрицательный угол атаки сразу дает увеличение профильных потерь.

5. Полученные на основе экспериментов данные могут быть использованы и при проектировании, когда выбираются геометрические параметры и анализируется обтекание решетки с целью определить ее эффективность, наилучшим образом отвечающую заданным условиям работы турбины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аэродинамическое** совершенствование лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин / Е.А. Гукасова, М.И. Жуковский, А.М. Завадовский, Л.М. Зысина-Моложен, Н.А. Скарнарь, В.Г. Тырышкин. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960.
2. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я.** Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машиностроение, 1965.
3. **Атлас** экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин / В. Д. Венедиктов, А.В. Грановский, А.Н. Карелин, А.Н. Колесов, М.Х. Мухтаров. М.: ЦИАМ, 1990.
4. **Венедиктов В.Д., Соколова Н.Е.** Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток осевых турбин. М.: ЦИАМ, 1996.
5. **Абианц В.Х.** Теория авиационных газовых турбин. М.: Машиностроение, 1979.
6. **Мамаев Б.И., Стародумов А.В., Полубояринова С.А.** Влияние толщины входной кромки профиля на потери в турбинной решетке от угла атаки // *Авиационная техника*. 2019. № 2. С. 95–101.
7. **Емин О.Н., Лысенко Г.Н.** Исследование течений и потерь в плоских турбинных решетках при больших отрицательных углах атаки // *Теплоэнергетика*. 1971. № 1. С. 73–75.
8. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
9. **Экспериментальное** исследование влияния конструктивного угла входа на эффективность проектируемых решеток профилей / Б.М. Аронов, А.К. Богатырев, В.М. Епифанов, Б.И. Мамаев, И.Б. Шкурихин // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1975. № 3. С. 111–115.

## Study of Turbine Cascades at Negative Incidence Angles

B. I. Mamaev<sup>a</sup> and G. V. Ermolaev<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> *Lyulka Design Bureau, Branch of PAO ODK UMPO, Moscow, 129301 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: ermolaev\_grigory@mail.ru*

**Abstract**—Based on the analysis of experimental data, the influence of incidence angle on the blade loading and profile loss (hereinafter referred to as loss) in flat turbine cascades of axial turbines is refined. Wide ranges of geometric and operating parameters of sub- and transonic planner cascade are covered. It is shown that a negative incidence angle in terms of its effect on loss is a more complex phenomenon than a positive one. In the range of its moderate values, when a high velocity peak has not yet appeared on the blade pressure side near the leading edge, the improvement in loading on the suction side can overpower the deterioration in loading on the pressure side and incidence losses can become negative. Most cascades have a range of these negative incidence angle, in which the incidence angle loss is zero or first decreases, reaches a negative minimum, and then begins to increase. As the cascade convergence increases, the width of this range increases, and the losses decrease. As a rule, negative losses from the incidence angle are found in cascades in which, there is a velocity peak on the suction side near the edge under the design incidence. If a cascade with reduced convergence ratio and significant local diffusion ratio of the channel has a high velocity peak near the leading edge on the pressure side, then negative incidence angle leads to an increase in loss. To calculate the loss versus the incidence angle, it is advisable to divide the cascades into groups depending on the nature of the change in the loss versus the incidence angle and to establish the ranges of values of the main geometric parameters of the cascades common for each group.

**Keywords:** cascade, pressure side, leading edge, convergence ratio, negative incidence angle, flow exit velocity, blade loading, velocity peak, channel diffusion ratio, profile loss