

ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФFUЗОРНЫХ РЕШЕТОК СИЛЬНО ИСКРИВЛЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Ю. В. Степанов

В настоящее время в промышленности широко распространены воздуходувные машины лопаточного типа (компрессоры, воздуходувки, вентиляторы). Среди них велик удельный вес вентиляторов главным образом центробежного типа. Это объясняется их способностью в сравнении с осевыми вентиляторами обеспечивать в одной ступени гораздо большие напоры (большие повышения давления).

Однако осевые машины при одинаковых диаметральных габаритах с центробежными обладают более высокой производительностью. Кроме того, как известно, к. п. д. осевых машин выше, чем у центробежных. Поэтому изыскание путей повышения напора осевых ступеней с целью создания машин, обладающих в малых габаритах большими напорами и высокой производительностью, является задачей актуальной для многих областей народного хозяйства.

Повысить напор осевой ступени возможно за счет увеличения окружной скорости и путем повышения коэффициента напора \bar{H} . Увеличение окружных скоростей для вентиляторных машин ограничивается требованиями бесшумности в работе и прочности лопаток рабочего колеса.

Повышение же коэффициента напора связано с обеспечением больших отклонений потока в лопатках рабочего колеса при условии безотрывного обтекания. Эту задачу принципиально можно решить различными путями и в том числе увеличением кривизны профилей лопаток.

В настоящей статье изложены результаты опытных исследований диффузорных решеток сильно искривленных профилей. Опыты осуществлялись в двух аэродинамических трубах.

1. Течение газа в диффузорных решетках сильно искривленных профилей

Продувки диффузорных решеток профилей типа С-4 60° кривизны с густотой $b/t = 1,667$; 2 и 2,5 в диапазоне углов атаки $-5^\circ \div +5^\circ$ при относительном удлинении лопатки $h/b = 2,5$ и при числе $Re' = 4 \cdot 10^5$ показали наличие почти безотрывного обтекания в среднем по высоте сечении лопатки. На рисунке 1 представлены кривые распределения полного напора по шагу за решетками трех густот при угле атаки $i = 0^\circ$. Как следует из графика, распределение полного напора по шагу, особенно в решетках с $b/t = 2$ и 1,667, в основном равномерно. Аэродинамический след за лопаткой в плоскости измерения, удаленной от решетки на величину $0,75t$ для густоты $b/t = 2$ занимает всего $0,2t$, для густоты $b/t = 1,667$ — $0,025t$ и для густоты $b/t = 2,5$ — $0,44t$. Наличие наименьшей зоны потери полного напора у решетки с густотой $b/t = 2$ свидетельствует о наименьших потерях энергии. Увеличение зоны потерь в

решетке меньшей густоты ($b/t = 1,667$) объясняется, по всей вероятности, началом образования отрыва потока на спинке лопатки. Увеличение этой зоны в решетке с густотой $b/t = 2,5$ обусловливается уменьшением шага решетки: абсолютная величина зоны аэродинамического следа осталась примерно такой же, как и в решетке густотой $b/t = 2$, но из-за уменьшения шага относительная величина затененной зоны значительно увеличилась.

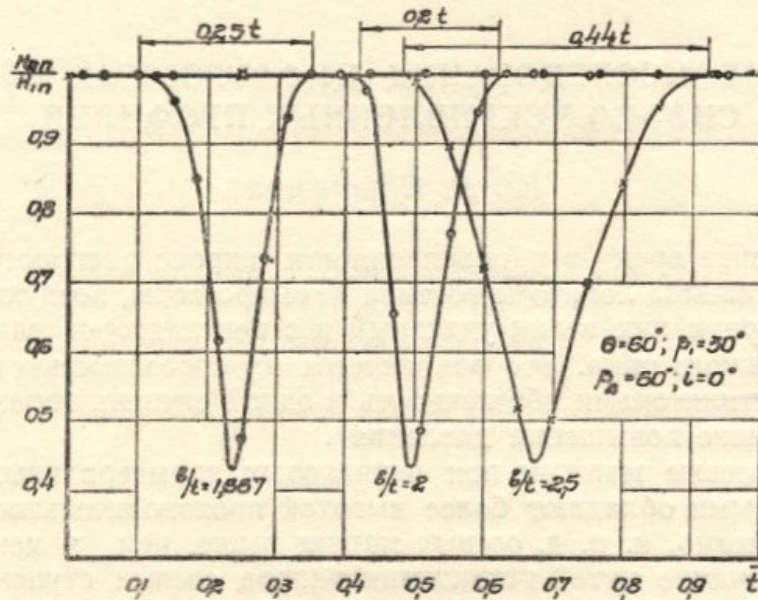


Рис. 1.

На рисунках 2 и 3 представлены графики зависимости коэффициента потерь в решетках различных густот при различных углах атаки, из которых следует, что наиболее оптимальной густотой для решеток профилей 60° кривизны действительно является густота, лежащая в пределах

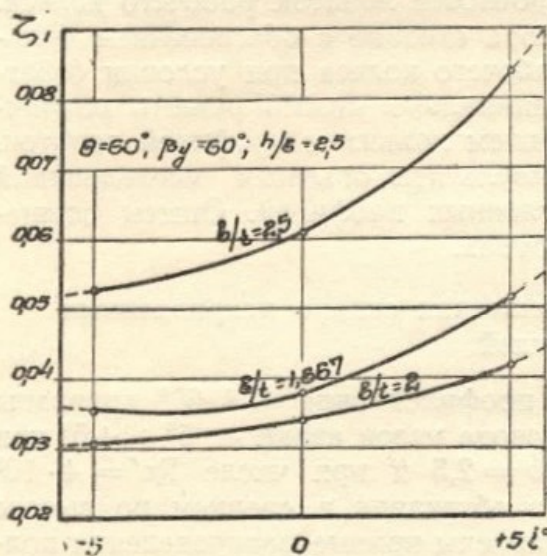


Рис. 2.

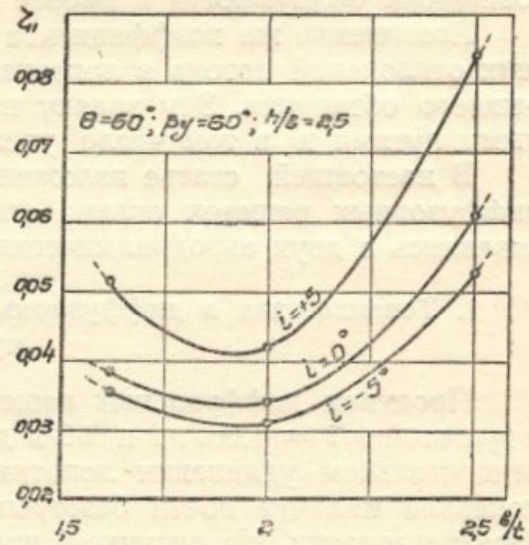


Рис. 3.

$b/t = 1,9 - 2$. Для этих густот коэффициент потерь в решетке в диапазоне углов атаки $-5^\circ - +5^\circ$ по данным замеров в среднем сечении колебался в пределах $\zeta_1 = 0,031 - 0,042$, коэффициент лобового сопротивления $C_x = 0,021 - 0,031$ и величина обратного качества $\mu = 0,023 - 0,026$. Полученные результаты подтверждают высказанные ранее предположения о возможности обеспечения безотрывного обтекания диффу-

зорных решеток сильно искривленных профилей за счет увеличения густоты решетки. Показательным является также то обстоятельство, что в диапазоне углов атаки от -5° до $+5^\circ$ абсолютная величина коэффициента потерь меняется незначительно.

На рисунке 4 слева представлена зависимость величины обратного качества μ от угла отклонения потока в решетке ε по опытам кандидата технических наук С. А. Паршика для диффузорной решетки профилей кривизной $\Theta=30^\circ$, густотой $b/t=1$ и геометрическими углами натекания и выхода, равными 60° и 90° , соответственно. Как следует из графика, изменение угла отклонения потока в решетке на 10° приводит к существенному изменению μ (минимальное значение $\mu=0,02$, максимальное $\mu=0,08$). На этом же рисунке справа изображен аналогичный график, полученный автором для диффузорной решетки профилей кривизной $\Theta=60^\circ$, густотой $b/t=2$ и углами: $\beta_1=30^\circ$, $\beta_2=90^\circ$. Изменение угла отклонения потока в решетке на 7° в этом случае изменяет μ незначительно (от $\mu=0,021$ до $\mu=0,026$). К сожалению, ограниченные возможности экспериментальной установки не позволили автору провести исследование в более широком диапазоне углов натекания. Тем не менее, даже

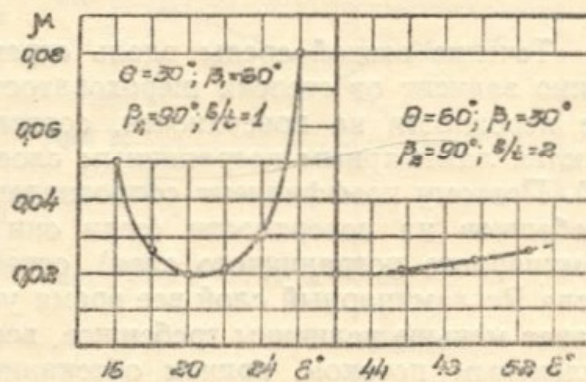


Рис. 4.

на основании полученных результатов можно полагать, что применение сильно изогнутых профилей в густых решетках позволит получить машины с более полой характеристикой и расширит диапазон их рабочих режимов.

Наличие безотрывного обтекания густых решеток сильно искривленных профилей расширяет диапазон применения экспериментальной формулы, полученной в результате обобщения данных систематических продувок плоских решеток для определения угла схода потока. Как известно, эта формула имеет вид:

$$\delta = m\Theta \sqrt{\frac{t}{b}}, \quad (1)$$

где δ — угол схода потока в решетке;
 Θ — кривизна профиля;

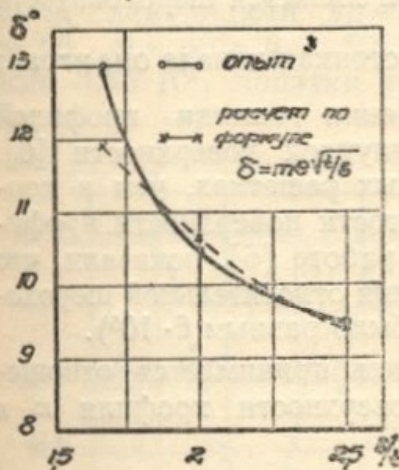


Рис. 5.

$$m = 0,92x_f^2 + 0,1 \frac{90 - \alpha_2}{50}.$$

Здесь x_f — относительная величина, определяющая положение точки максимального прогиба профиля;

α_2 — угол между осью решетки и направлением скорости потока на выходе из нее.

На рисунке 5 представлен график изменения δ в зависимости от густоты решетки профилей $\Theta=60^\circ$; $\beta_1=30^\circ$; $\beta_2=60^\circ$; $i=0^\circ$. Одна из

кривых получена опытным путем, другая — в результате расчета по формуле (1).

Совпадение расчетных и опытных значений углов скоса потока для густых решеток сильно искривленных профилей вполне удовлетворительное. Расхождение наблюдается при уменьшении густоты решетки. Оно обуславливается началом обтекания с отрывом потока, что уже наблюдается в решетке профилей $b/t = 1,667$. Таким образом, можно полагать, что формула (1) справедлива и для углов поворота потока более $40-45^\circ$, рекомендуемых в качестве предельных для ее применения.

2. Влияние качества поверхности профиля в диффузорной решетке

Течение вязкой среды вдоль ограничивающей поверхности существенно зависит от степени шероховатости последней. При малых числах Re неровности на поверхности, составляющие ее шероховатость, обтекаются ламинарным пограничным слоем без срывов и образования вихрей. Поэтому коэффициент сопротивления вне зависимости от величины гребешков на поверхности (если они полностью находятся в области ламинарного пограничного слоя) остается неизменным. С увеличением числа Re ламинарный слой все время уменьшается, и, когда его толщина станет меньше величины гребешков, вершины последних обтекаются турбулентным потоком, причем обтекание сопровождается интенсивным срывом вихрей. При больших числах Re в ламинарном пограничном слое находятся только основания гребешков. Местные срывы с вершин гребешков способствуют перемещению вверх по потоку точки турбулентного отрыва при обтекании криволинейной стенки с положительным градиентом давления, что ведет к увеличению области завихрения.

Исследования по влиянию шероховатости на сопротивление изогнутых каналов [1] показывают, что определяющей является шероховатость на внутренней стенке ($\frac{dp}{dx} > 0$), на остальных же стенках канала она играет второстепенную роль. Точно так же при обтекании решетки профилей определяющей является шероховатость на выпуклой поверхности [6], причем она больше сказывается в диффузорных решетках, чем в конфузорных. Исследования по влиянию шероховатости поверхности профилей в турбинной решетке опубликованные в работе [6], показали, что коэффициент потерь резко возрастал при значении относительной шероховатости $\epsilon > 50 \cdot 10^{-2}$ (число Re при испытаниях было равным $6 \cdot 10^5$).

Под относительной шероховатостью ϵ здесь принимается отношение абсолютной величины гребешков, на поверхности профиля k в микронах к хорде профиля b в миллиметрах:

$$\epsilon = \frac{k}{b}.$$

Опыты, проведенные автором, показали, что качество поверхности профилей в диффузорных решетках сильно искривленных профилей оказывает еще большее влияние на величину потерь. Об этом свидетельствуют результаты продувок одинаковых решеток на одних и тех же аэродинамических трубах, но с различной относительной шероховатостью испытуемых профилей. На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента потерь ζ_1 в функции угла атаки, полученная в результате

продувок решетки профилей одних и тех же геометрических параметров ($\Theta=60^\circ$, $b/t=2$, $h/b=1,66$, $\beta_y=60^\circ$, $\beta_1=30^\circ$), но при различных относительных шероховатостях профиля. Число Рейнольдса при продувках было равным $Re=1,64 \cdot 10^5$. Нижняя кривая относится к опытам, проведенным С. А. Парщиком с профилями, имеющими относительную шероховатость профиля $\varepsilon=3,33 \cdot 10^{-2}$. Верхняя кривая получена автором для профилей с относительной шероховатостью $\varepsilon=26,6 \cdot 10^{-2}$. Абсолютная величина гребешков определялась при помощи интерферометра Линника.

Из графика следует, что улучшение качества поверхности профиля резко снижает величину потерь в решётке. Кроме того, качество поверхности в значительной мере сказывается и на влиянии углов атаки. Если в профиле с относительной шероховатостью $\varepsilon=26,6 \cdot 10^{-2}$ на отрицательных углах атаки обтекание значительно ухудшалось, то при относительной шероховатости $\varepsilon=3,33 \cdot 10^{-2}$ влияние углов атаки в диапазоне от -5° до $+5^\circ$ было незначительным, причем обтекание даже несколько улучшалось при отрицательных углах.

На рисунке 7 представлен график распределения полного напора за решеткой при продувках решеток профилей с различной шероховатостью. Геометрические параметры решеток были следующими: $b/t=2$, $h/b=2,5$, $\Theta=60^\circ$, $\beta_y=60^\circ$, $\beta_1=30^\circ$. Число Re при продувках было равным $3,85 \cdot 10^5$. Лопатки имели относительную шероховатость $\varepsilon=4 \cdot 10^{-2}$, и $\varepsilon=75 \cdot 10^{-2}$. Шероховатость $\varepsilon=75 \cdot 10^{-2}$ создавалась нанесением на поверхность лопатки слоя песка с определенным диаметром зерен, удерживавшихся на профиле при помощи масляной связки. При значительной шероховатости лопаток распределение полного напора за решеткой становилось неравномерным, зона срыва потока занимала почти весь канал, потери резко возрастали. Если для решетки с $\varepsilon=4 \cdot 10^{-2}$ при $i=0^\circ$ коэффициент потерь ζ_1 был равен 0,038, то при относительной шероховатости $\varepsilon=75 \cdot 10^{-2}$ он увеличивался до 0,17.

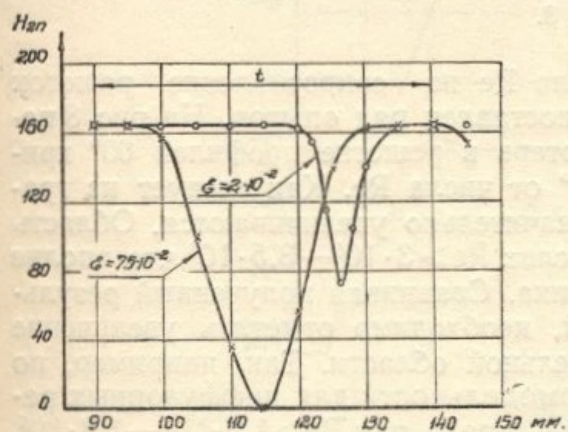


Рис. 7.

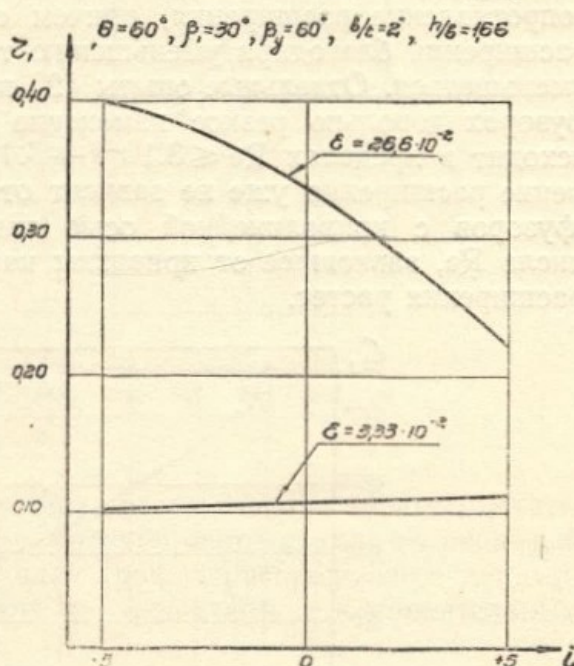


Рис. 6.

Таким образом, при проектировании и изготовлении высоконапорных осевых ступеней, оснащенных диффузорными решетками сильно искривленных профилей, с целью повышения к. п. д. необходимо уделять достаточное внимание получению качественной поверхности лопаток.

3. Влияние числа Рейнольдса на величину потерь при обтекании диффузорной решетки сильно изогнутых профилей

Вопрос о влиянии числа Re на величину потерь потока в диффузорных каналах изучен недостаточно не только для каналов с криволинейной осью, но и для прямолинейных. В работе [2] указывается, что отсутствие систематических исследований не дает возможности в настоящее время учитывать в расчетах влияние числа Re на сопротивление расширения. Однако можно все же предполагать, что с изменением числа Re в диффузорных каналах меняется не только сопротивление трения, но и сопротивление расширения, причем с ростом числа Re сопротивление расширения благодаря уменьшению толщины пограничного слоя должно уменьшаться. Отдельные опыты [2] показывают, что в прямоосных диффузорах довольно резкое изменение коэффициента сопротивления происходит в пределах $Re \leq 3 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^5$. Выше этих значений сопротивление расширения уже не зависит от числа Re . Очевидно, что для диффузоров с криволинейной осью также существует какое-то значение числа Re , зависящее от кривизны канала, ниже которого сопротивление расширения растет.

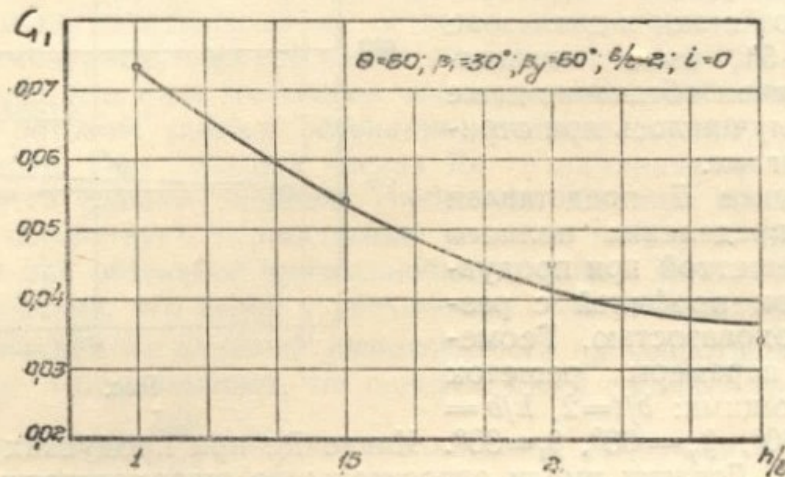


Рис. 8.

С целью выяснения влияния числа Re на сопротивление решеток сильно искривленных профилей был поставлен ряд опытов. На рис. 8 показана зависимость коэффициента потерь в решетке профилей 60° кривизны, густотой $b/t = 2$ при $i = 0^\circ$ от числа Re . Как следует из графика, в области малых Re потери значительно увеличиваются. Область автомодельности наблюдалась при числах $Re \geq 3 \cdot 10^5 - 3,5 \cdot 10^5$, что вполне согласуется с данными И. Е. Идельчика. Сравнивая полученный результат с опытами других исследований, необходимо отметить увеличение чисел Re , соответствующих автомодельной области. Так, например, по опытам Н. А. Скнар [3] область автомодельности для диффузорных решеток мало искривленных профилей наступала при $Re \geq 1,6 \cdot 10^5 - 1,8 \cdot 10^5$, по опытам С. А. Парщика при $Re \geq 1,5 \cdot 10^5$. Поэтому следует полагать, что эффективное применение диффузорных решеток сильно искривленных профилей целесообразно при более высоких значениях Re в сравнении с решетками мало искривленных профилей. Приведенные выше результаты нельзя рассматривать как окончательные. Ни в опытах, проведенных автором, ни в опытах вышеуказанных исследователей при определении влияния числа Re на коэффициент потерь, к сожалению, не учитывалась степень начальной турбулентности потока.

4. Влияние относительного удлинения на обтекание сильно искривленного профиля в диффузорной решетке

Коэффициент сужения потока в решетках с относительным удлинением $h/b=1,66$ колебался в пределах $\varphi=0,7-0,75$, а при увеличении h/b до 2,5 он уменьшился до $\varphi=0,63-0,65$.

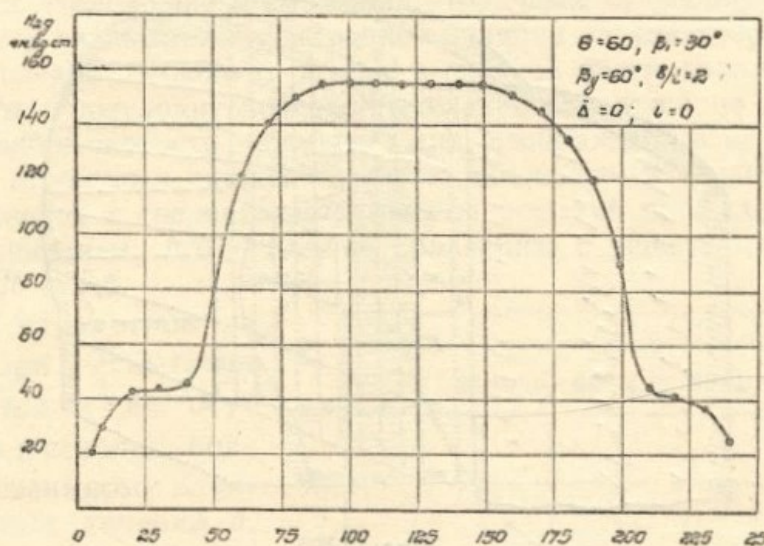


Рис. 9.

Некоторые предположения о причинах этого явления можно сделать, анализируя распределение скоростей в средней части канала за решеткой по ее высоте. На рисунке 9 представлен график распределения динамических напоров (скоростей) по высоте за решеткой с относительным

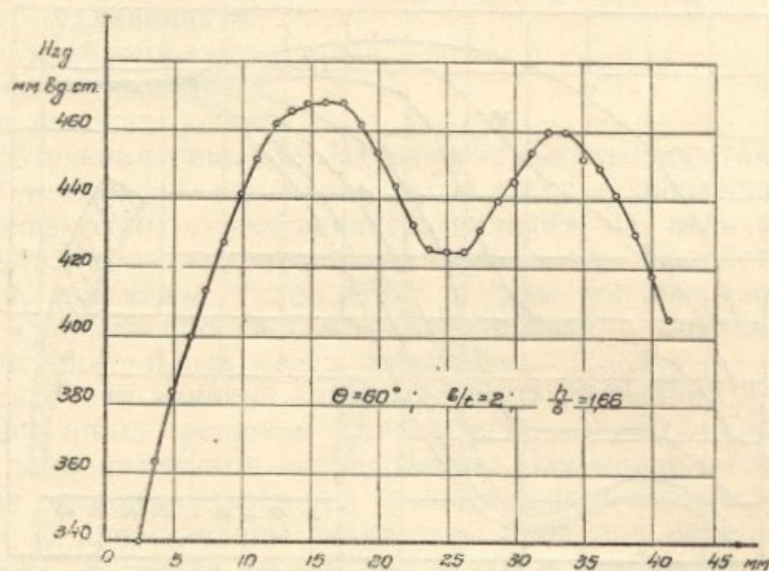


Рис. 10.

удлинением лопатки $h/b = 2,5$. На рисунке 10 такой же график представлен для решетки с относительным удлинением лопатки $h/b = 1,66$. Различие в распределении скоростей очевидно можно объяснить неодинаковым воздействием вторичных течений на поток в средней части высоты лопаток для разных относительных удлинений. Интенсивность вторичных течений в диффузорных решетках существенно зависит от кривизны профилей в них. В решетках сильно искривленных профилей

При значительных положительных градиентах давления, как показали опыты, вторичные течения проявляются более интенсивно, чем в решетках слабо изогнутых профилей. Развитие вторичных течений ведет к нарушению плоского характера потока в решетке, что достаточно наглядно иллюстрируется рисунками 11 и 12.

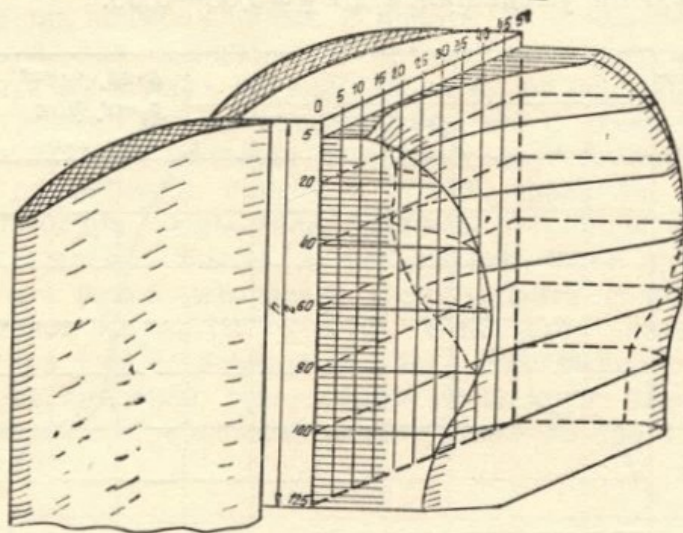


Рис 11.

На рисунке 11 представлена пространственная картина течения газа в плоскости $t \times \frac{h}{2}$ по опытам, проведенным аспирантом Харьковского авиаинститута С. Д. Фроловым, на решетке профилей $\theta = 60^\circ$, $\beta_1 = 30^\circ$,

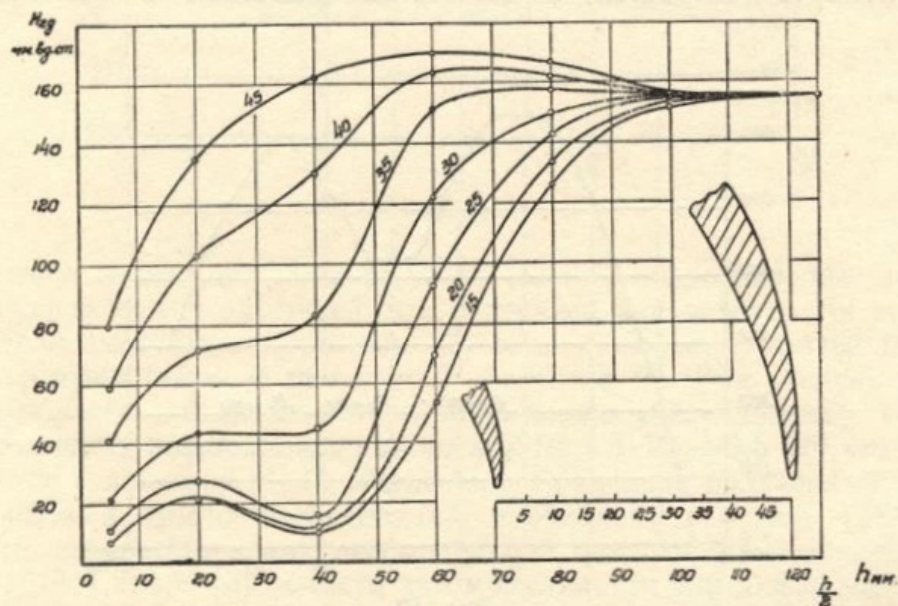


Рис. 12.

$\beta_2 = 60^\circ$, $b/t = 2,0$, $h/b = 2,5$. Аналогичные результаты получены и автором настоящей работы. На рисунке 12 показано распределение скоростей по высоте за решеткой в плоскостях через $0,1t$. Из рисунков 11 и 12 следует, что горизонтальные составляющие скорости в зоне воздействия вторичных течений существенно уменьшаются, причем наиболее сильное их изменение сказывается в плоскостях, расположенных ближе к выпуклой поверхности профиля. Из рисунков также

следует, что ошутимое влияние вторичных течений при высоте лопатки, равной 250 мм, распространяется примерно на 200 мм высоты, что составляет $h'/b = 2$.

Поэтому можно предположить, что при продувках решеток профилей 60° кривизны при относительном удлинении лопаток $h/b = 1,66$ вторичные течения в среднем сечении высоты лопатки накладывались друг на друга. Наложение и смыкание вторичных движений в плоскости средин лопаток оказывает существенное влияние на характер потока [5].

Сопротивление движению потока в средней части канала при этом увеличивается, происходит перераспределение скоростей по высоте. Характер изменения скорости принимает вид, изображенный на рисунке 10. Наложением вторичных движений можно объяснить и увеличение коэффициента сужения в средней части высоты решетки профилей с относительным удлинением $h/b = 1,66$ по сравнению с решетками профилей, имевшими $h/b = 2,5$.

Замеры параметров за решеткой при испытании решеток с $h/b = 1,66$ осуществлялись в сечении, подверженном взаимному влиянию вторичных течений и, следовательно, в зоне повышенных потерь. Это обстоятельство и явилось одной из причин расхождения в результатах экспериментальных данных при продувках решеток с различными относительными удлинениями. Этим же, по всей вероятности, частично определяется и различное влияние углов

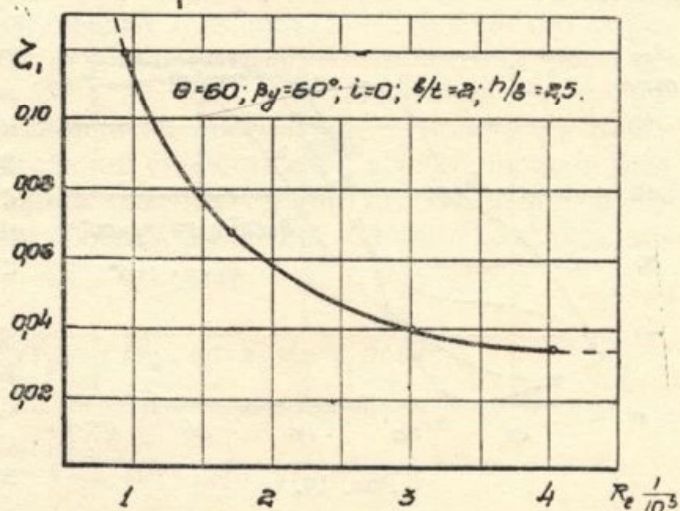


Рис. 13.

атаки при обтекании решеток. На участке высоты лопатки, не занятой вторичными течениями, изменение углов атаки в диапазоне от -5 до $+5^\circ$ не оказывало существенного влияния на величины потерь. В плоскости замеров, подверженных взаимному воздействию вторичных течений, изменение углов атаки в этом же диапазоне сказывалось более существенно на коэффициенте потерь, причем ζ_1 увеличивался при отрицательных углах натекания.

Для выяснения влияния относительного удлинения на характеристики диффузорных решеток сильно искривленных профилей были проведены дополнительные исследования. Изменение высоты испытуемых лопаток осуществлялось при помощи тонких отсекающих пластин. На рисунке 13 представлены результаты продувок решеток профилей $\theta=60^\circ$, $\beta_1=30^\circ$, $\beta_y=60^\circ$, $b/t=2$ при $i=0^\circ$ и различных h/b . Как следует из графика, относительное удлинение профиля в решетке существенно сказывается на величине потерь. При уменьшении h/b от 2,5 до 1 коэффициент потерь ζ_1 увеличивался примерно в два раза.

Исследования с отсекающими пластинами, ширина которых была почти равна ширине решетки, показали, что явления, искажающие плоский характер течения, интенсивно развиваются внутри лопаточных каналов. Действительно, из графика (рис. 14) видно, что распределение скорости по высоте канала за решеткой в плоскости $0,4t$ не было равномерным, причем наибольшее отклонение от плоского характера наблю-

далось у решеток с малым относительным удлинением. Таким образом, отсекающие пластины, несмотря на исключение пограничного слоя на стенках экспериментальной установки, не позволяют все же получить плоское течение. Это вполне согласуется с опытами, изложенными в работе [3].

Однако пограничный слой на стенках трубы оказывает существенное влияние на интенсивность вторичных течений, особенно для диффузорных решеток с большой кривизной лопаток. Наличие развитого пограничного слоя на торцевых стенках значительно интенсифицирует вторичные течения, что приводит к еще большему нарушению плоского характера потока. На рисунке 14 толстой линией выделена кривая изменения скорости по высоте за решеткой (также в плоскости $0,4t$) для случая отсутствия отсекающих пластин ($h/b = 2,5$). В этом случае, несмотря на увеличение относительного удлинения, искажение плоского характера движения более значительно, чем в решетке $h/b = 2$, что свидетельствует

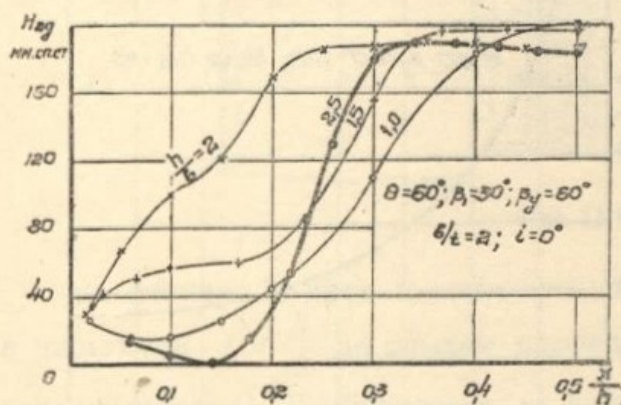


Рис. 14.

о более мощных вторичных течениях. Поэтому исследования с отсекающими пластинами не могут строго моделировать картину течения в трубе с наличием развитого пограничного слоя на торцевых стенках.

Изменение относительного удлинения при помощи отсекающих пластин позволило сделать вывод о независимости абсолютной интенсивности вторичных течений от h/b . Действительно, для всех трех случаев испытываемых $h/b = 2; 1,5$ и 1 область, подверженная воздействию вторичных течений, одинакова и распространяется от отсекающей пластины по высоте лопатки примерно на расстояние шага (рис. 14). Независимость абсолютной интенсивности вторичных течений от относительного удлинения (если вторичные течения не смыкаются в середине лопатки) подтверждаются опытами, опубликованными в работе [5].

Таким образом, при малой развитости пограничного слоя на торцевых стенках (отсекающие пластины) влияние относительного удлинения на характер потока существенно ослабляется в сравнении с сильно развитым пограничным слоем на стенках, когда даже при значительном h/b может произойти наложение вторичных течений в средней части высоты лопатки.

На основании вышеизложенного можно полагать, что относительное удлинение профиля оказывает значительное влияние на характер течения газа в решетке. Для получения удовлетворительных результатов при применении сильно искривленных диффузорных решеток профилей необходимо, как показали опыты, обеспечить относительное удлинение $h/b \geq 2$.

5. Возможности применения сильно искривленных профилей для высоконапорных осевых ступеней

Проведенные опыты подтвердили возможность применения сильно искривленных профилей, составленных в густые решетки, для осевых ступеней с большими напорами.

Благодаря значительной густоте решетки и существенному сужению потока срывные явления в решетке сильно искривленных профилей значительно уменьшаются, а при правильном выборе кривизны, густоты и относительного удлинения лопатки могут быть сведены до минимума. В связи с этим исследования по определению интенсивности вторичных течений при различных кривизнах лопаток в диффузорных решетках, их воздействие на сужение потока при различных относительных удлинениях и различных густотах решетки с целью установления оптимальных значений этих величин являются чрезвычайно важными.

Если по конструктивным соображениям для заданных напоров в ступени (а, следовательно, для заданных θ при постоянных U и C_a) невозможно выдержать оптимальное относительное удлинение лопатки и густоту, то тогда можно прибегнуть к некоторому утолщению выходных кромок.

Для проверки возможности применения решеток сильно искривленных профилей в машинах был проведен приближенный расчет по определению к. п. д. вентиляторной ступени по данным продувок решетки $\theta = 60^\circ$, $b/t = 2$, $h/b = 2,5$, $\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_y = 60^\circ$, составленной из профилей типа С-4. Ступень имела осевой вход абсолютной скорости на рабочее колесо. Угол выхода относительной скорости из рабочего колеса был принят равным $80,5^\circ$ (на основании опытных данных). Величина среднего полного давления по всему каналу за решеткой определялась зависимостью:

$$H_{2п\text{ ср}} = \frac{\int_0^t \int_0^h H_{2п} \sqrt{H_{2п} - H_{2ст}} \sin \alpha_2 \sin \gamma_2 dt dh}{\int_0^t \int_0^h \sqrt{H_{2п} - H_{2ст}} \sin \alpha_2 \sin \gamma_2 dt dh},$$

где γ_2 — угол между направлением скорости потока и прямой, лежащей в плоскости высоты лопатки.

Абсолютная величина потерь в решетке по всей ее высоте равна:

$$h_w = H_{1п} - H_{2п\text{ ср}}.$$

Если приравнять

$$\gamma t l w_a h_w = C_x \rho b l \frac{W_m^2}{2},$$

где в левой и правой части выражена работа потерь, то после несложных преобразований можно получить выражение для C_x вида

$$C_x = \frac{2h_w g t \sin \beta_m}{b W_m^2 \gamma}. \quad (2)$$

Здесь h_w — абсолютная величина потерь в кг/м^2 .

Величина коэффициента обратного качества профиля в решетке определится следующим образом. Рассматривая план сил, действующих на профиль, можно написать

$$R_u = R_y \sin \beta_m + R_x \cos \beta_m.$$

После подстановки значений R_x , R_y и некоторых преобразований получим

$$R_u = C_x \rho b l \frac{W_m^2}{2} \cos \beta_m \left(\frac{\text{tg } \beta_m}{\mu} + 1 \right). \quad (3)$$

С другой стороны, сила R_u определяется изменением количества движения как

$$R_u = \Delta W_u \rho W_a t l. \quad (4)$$

Приравнявая (3) и (4) и решая относительно μ , получим

$$\mu = \frac{C_x b \cdot W_m \operatorname{tg} \beta_m}{2 \Delta W_u t \operatorname{tg} \beta_m - C_x b W_m}. \quad (5)$$

Подсчитанные по зависимостям (2) и (5) значения C_x и μ для вышеуказанной решетки профилей были соответственно равны: 0,08 и 0,10. Это позволило приближенно определить коэффициент полезного действия вентиляторной ступени, оснащенной такими решетками, при осевом входе в рабочее колесо.

К. п. д. определялся по зависимости:

$$\eta = 1 - \frac{z_k \mu_k C_{y_k} \rho_k b_k l_k \frac{W_m^3}{2} + z_c \mu_c C_{y_c} \rho_c b_c l_c \frac{C_m^3}{2}}{z_k \gamma_k t_k W_{ma} U \Delta W_u} g,$$

где $\mu_k C_{y_k} \rho_k b_k l_k \frac{W_m^3}{2}$ — работа потерь в рабочем колесе;

$\mu_c C_{y_c} \rho_c b_c l_c \frac{C_m^3}{2}$ — работа потерь в спрямляющем аппарате;

$z_k \gamma_k t_k l_k W_{ma} = z_c \gamma_c t_c l_c C_{ma}$ — расход через ступень.

Пренебрегая для вентиляторной ступени сжимаемостью и полагая $\rho_k = \rho_c$ и $\gamma_k = \gamma_c$, а также приближенно считая, что $\mu_k = \mu_c$ и $z_k = z_c$, и учитывая, что

$$\Gamma = \frac{C_y b W_m}{2},$$

получим

$$\eta = 1 - \mu \frac{\frac{\Gamma_k W_m^2}{t_k W_{ma}} + \frac{\Gamma_c C_m^2}{t_c C_{ma}}}{\Delta W_u U}.$$

Так как $\Gamma_k = t_k \Delta W_u$ и $\Gamma_c = t_c \Delta C_u$, то окончательно

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{W_m^2}{W_{ma}} + \frac{C_m^2}{C_{ma}} \right)}{U} \mu.$$

Определенный по этой зависимости к. п. д. ступени с вышеуказанными решетками оказался равным 0,805.

Это значение к. п. д. подсчитано без учета влияния радиального зазора. Необходимо отметить, что для диффузорных решеток сильно изогнутых профилей влияния радиального зазора будет иным, чем в обычных решетках профилей, мало изогнутых. С одной стороны, благодаря значительному перепаду давлений отрицательное влияние радиального зазора у сильно изогнутого профиля в решетке увеличится. С другой же стороны, благодаря значительному сужению потока в области зазора будет протекать меньше газа, чем в средних сечениях лопаток, что уменьшит влияние зазора. Действительную картину учета радиального зазора можно установить самостоятельным экспериментальным и теоретическим исследованиями.

В настоящем расчете влияние зазора приближенно учитывалось по данным для обычных компрессорных профилей.

Если принять величину относительного радиального зазора равной 2%, то по данным, приведенным в ряде работ, следует, что падение к п. д. составит 2—2,5% от максимального.

Кроме того, учитывая существенное сужение потока в ступени, необходимо поставить на выходе диффузор. При принятых значениях скорости и учитывая необходимость уменьшения скорости в выходном диффузоре до значения скорости на входе в ступень, расчетом установлено, что падение полного давления в диффузоре составит 2—3%. Расчет потерь производился по зависимости коэффициента смягчения удара от угла раствора диффузора. Угол раствора диффузора был принят равным 10°.

Поэтому общий полный к. п. д. вентиляторной ступени с вышеуказанными профилями будет примерно равен $\eta \simeq 0,75—0,77$.

Можно предполагать, что в действительности к. п. д. может быть выше. В вышеприведенном расчете принято равенство величин обратного качества профилей решетки рабочего колеса и спрямляющего аппарата. Из-за наличия интенсивных вторичных течений величина μ для профилей решетки рабочего колеса была значительной и равной 0,1. Вихревое движение, вызванное вторичными течениями, образовавшееся в рабочем колесе, поступает в спрямляющий аппарат. В решетке последнего вторичные течения образуют вихрь противоположного направления. Наложение двух вихрей противоположного знака может привести к частичному гашению вихревого движения в спрямляющем аппарате. Поэтому можно предполагать, что в последнем величина обратного качества будет гораздо меньше, чем у профиля решетки рабочего колеса и, следовательно, к. п. д. всей ступени увеличивается.

Это предположение подтверждается некоторыми сведениями о работе выполненных высоконапорных ступеней, оснащенных сильно искривленными лопатками. Так, например, по данным [4], высоконапорная осевая ступень обладала к. п. д., равным 0,8—0,85.

Применение такого типа вентиляторных ступеней резко повышает напорность последних.

Рассчитанная по опытным данным продувок решеток, ступень вентилятора с лопатками 60° кривизны при условии осевого входа может обеспечить коэффициент напора, равный $\bar{H} \simeq 0,84$ (против $\bar{H} = 0,28$ у вентиляторов ЦАГИ серии «В»). Это позволяет при окружной скорости $U = 150$ м/сек обеспечить напор, примерно равный 2300 мм водяного столба, что уже выходит за рамки вентиляторных машин.

Опыты, проведенные на решетках, позволяют также предположить, что высоконапорные машины с сильно изогнутыми лопатками будут иметь более пологую рабочую часть характеристики машины, поскольку при изменении углов атаки потери в решетке изменяются незначительно.

В силу вышеизложенного можно утверждать, что создание осевых вентиляторных машин, сочетающих в одной ступени большую пропускную способность и большие напоры, должно идти по пути применения сильно искривленных профилей в густых диффузорных решетках.

Можно полагать, что ступени такого типа, обладая малыми габаритами и высокой напорностью, по своей экономичности не уступят некоторым типам центробежных машин. Поэтому замена ряда громоздких центробежных вентиляторов малогабаритными высоконапорными осевыми машинами может во многих случаях привести к значительным преимуществам.

6. Заключение по результатам проведенных опытов

1. Результаты опытов показали возможность безотрывного обтекания диффузорных решеток сильно искривленных профилей. Так, в решетке профилей С-4 кривизной $\Theta = 60^\circ$, $\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$, $b/t = 2$, $h/b = 2,5$ в диапазоне углов атаки от -5° до $+5^\circ$ коэффициент потерь ζ_1 , коэффициент лобового сопротивления C_x и величина обратного качества μ находились в пределах: $\zeta_1 = 0,031 - 0,042$, $C_x = 0,021 - 0,031$, $\mu = 0,023 - 0,026$.

2. Для решеток профилей 60° кривизны наиболее оптимальной является густота, лежащая в пределах $b/t = 2$. Увеличение густоты выше этого предела приводит при наличии безотрывного обтекания к относительному увеличению потерь трения. Уменьшение же b/t также ведет к увеличению потерь из-за наличия элементов срывного обтекания.

3. Для значений $b/t \approx 2$ замечено хорошее совпадение опытных значений углов скаса потока δ с результатами, вычисленными по общеизвестной формуле, полученной в результате обобщения данных продувок решеток мало искривленных профилей: $\delta = m \theta \sqrt{t/b}$. Это расширяет диапазон применения формулы и позволяет предполагать о возможности ее применения в случаях, когда обтекание не сопровождается срывными явлениями и для решеток большой кривизны.

4. Изменение углов атаки несущественно сказывается на величине потерь в решетке. По данным опытов в диапазоне $i = -5^\circ \div +5^\circ$ величина обратного качества профиля в решетке изменялась в пределах от $\mu = 0,021$ до $\mu = 0,026$ (меньшие значения μ соответствуют отрицательным углам атаки). Это позволяет сделать заключение о возможности получения пологих характеристик у машин, оснащенных ступенями с сильно искривленными лопатками.

5. Экспериментальные исследования показали, что качество обработки поверхности профиля оказывает существенное влияние на величину потерь в решетке. Коэффициент потерь ζ_1 при увеличении относительной шероховатости от $4 \cdot 10^{-2}$ до $75 \cdot 10^{-2}$ увеличивался от 0,038 до 0,17. Качество поверхности профиля оказывает существенное влияние и на обтекание при различных углах атаки. Если при относительной шероховатости $3,33 \cdot 10^{-2}$ коэффициент потерь при обтекании профиля на углах атаки в диапазоне от -5° до $+5^\circ$ практически не менялся, то при относительной шероховатости $26,6 \cdot 10^{-2}$ коэффициент потерь ζ_1 при продувках с $i = -5^\circ$ увеличивался почти вдвое по сравнению с продувками при $i = +5^\circ$. Поэтому обработка сильно искривленных профилей для диффузорной решетки должна быть довольно тщательной.

6. Числа Re в определенном диапазоне оказывают существенное влияние на характер обтекания решетки. По данным испытаний, область автомодельности для решетки профилей 60° кривизны наступала при $Re \geq 3 \cdot 10^5 - 3,5 \cdot 10^5$. Это позволяет полагать, что для диффузорных решеток сильно искривленных профилей граница области автомодельности сдвигается в сторону больших чисел Re , поскольку по опытам других авторов при испытаниях решеток мало искривленных профилей область автомодельности начиналась уже при $Re 1,5 \cdot 10^5 - 1,8 \cdot 10^5$.

7. При течении газа в решетке возникают вторичные течения, интенсивность которых возрастает с ростом кривизны профиля. Опытами установлено, что интенсивность вторичных течений также существенно зависит от развития пограничного слоя на торцевых стенках установки, ограничивающих лопатки.

8. Вторичные явления нарушают плоский характер течения и приводят к существенному сужению потока за решеткой. При правильном выборе относительного удлинения, густоты решетки и кривизны профиля сужение потока ведет к общему уменьшению диффузорности канала, что позволяет локализовать срывные явления. Опытами установлено, что для решетки профилей $\Theta = 60^\circ$ и $b/t = 2$ относительное удлинение профиля должно быть не меньше 2.

9. Приближенные расчеты, проведенные на основании опытных данных, показали, что в осевых вентиляторных ступенях, оснащенных сильно искривленными лопатками, можно получить коэффициент напора порядка 0,8 — 0,9 при к. п. д. 0,75—0,77.

10. Применение высоконапорных ступеней с сильно искривленными профилями позволит расширить рабочий диапазон осевых машин. Как показали опыты, влияние углов атаки на величину потерь в решетке незначительное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Идельчик И. Е. К вопросу о влиянии числа Рейнольдса и шероховатости на сопротивление изогнутых каналов, Промаэродинамика, 1953.
2. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления, Госэнергоиздат, 1954.
3. Скляр Н. А. Экспериментальное исследование и отработка решеток профилей осевых компрессоров при малых скоростях потока, Труды ЦКТИ, кн. 23, Машгиз, 1952.
4. Эккерт Б. Обзор экспериментальных работ по осевым компрессорам института двигательных установок в Штутгарте, сб. статей по осевым компрессорам ТРД, МАП, обзоры и переводы, № 39, 1949.
5. Scholz N. Secondary Flow Losses in Turbine Cascades, Journ. of the Aeron. Sciences, v. 21, N 10, 1954.
6. Speidel D. Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Strömungsverluste in ebenen Schaufelgittern, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, B. 20, N 5, 1954.