

УДК 533.6.011

© 1996 г.

Д.Е. ПУДОВИКОВ

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ РЕШЕТКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО МИНИМУМ СОПРОТИВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ:
РАБОЧЕЕ КОЛЕСО – СПРЯМЛЯЮЩИЙ АППАРАТ
И НЕЗАПЕРТОЕ СУЖАЮЩЕЕСЯ СОПЛО**

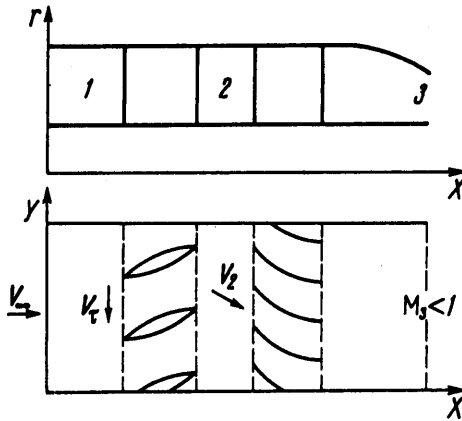
В линейном приближении решена вариационная задача построения тонких профилей плоской решетки в системе рабочее колесо – спрямляющий аппарат – сопло, обтекаемой сверхзвуковым потоком идеального (невязкого и не-теплопроводного) газа при дозвуковой нормальной к фронту решетки компоненте его скорости. Минимизируемым функционалом служит осевая компонента силы, действующей на всю систему. Условия, которым должны удовлетворять оптимизируемые профили, включают задание проекции силы, приложенной к решетке, на ось, параллельную ее фронту, и требование невозмущения потока перед ней. Рассматривается обтекание достаточно редких решеток, у которых "разрывные характеристики", идущие от нижней стенки профиля, не приходят на верхнюю образующую соседнего профиля.

Как и для изолированной решетки [1], решение задачи дается профилями, верхняя и нижняя образующие которых составлены из прямолинейных отрезков. В рассчитанном примере оптимальными являются четырехугольные профили, углы наклона участков образующих которых определяются условиями двустороннего экстремума.

1. Рассмотрим систему, моделирующую кольцевой канал (фиг. 1), содержащий ротор (решетку профилей), статор (спрямляющий аппарат) и сужающееся сопло. На входе в канал заданы параметры набегающего дозвукового потока, на выходе – давление в выходном сечении сопла. Последнее предполагается близким (или равным) давлению в набегающем потоке, в силу чего сопло работает в незапертом режиме. Ось x направим по нормали к фронту решетки, параллельно вектору скорости набегающего потока. Ось y перпендикулярна оси x и соответствует угловой координате в цилиндрической системе координат, связанной с кольцевым каналом.

Если скорость вращения решетки V_τ достаточно велика, то при переходе в связанную с ней систему координат относительная скорость набегающего потока станет сверхзвуковой (такая ситуация типична для концевых участков лопаток первых ступеней современных компрессоров). Таким образом x -дозвуковые потоки справа и слева от решетки оказываются разделенными участком сверхзвукового течения.

Как и в [1], в задаче ставится требование невозмущения потока перед решеткой. Дело в том, что в случае обтекания решетки профилей произвольной формы от нее (см., например, [2]) вверх по потоку распространяются скачки, которые в акустическом приближении не затухают. В случае воздушно-реактивного двигателя, эти возмущения, излучаясь из воздухозаборника, становятся источником крайне неприятной составляющей шума, воспринимаемой как "визг пилы". Чтобы такие возмущения не возникли, начальный участок верхней образующей профиля решетки сделан прямым и совпадающим с направлением набегающего потока. Рассматривае-



Фиг. 1

мая далее схема течения в решетке аналогична схеме течения, изученной в [1], поэтому в ее детальном описании нет необходимости. Напомним только, что профили предполагаются тонкими, в силу чего справедливо использование линейного приближения. Это накладывает определенные ограничения на уровень допустимых отклонений от параметров набегающего потока, а именно: для любого возмущения f должно выполняться условие $|f| \leq k$, где k – достаточно малая положительная константа.

Индекс ∞ припишем параметрам дозвукового потока на входе в канал, индекс 1 соответствует заданным параметрам сверхзвукового потока слева от решетки, 2 – параметрам осредненного дозвукового течения между решеткой и спрямляющим аппаратом и 3 – параметрам в выходном сечении сопла. В качестве масштаба длины удобно взять ширину решетки l , а в качестве масштабов скорости, плотности, давления и сил V_∞ , ρ_∞ , $\rho_\infty V_\infty^2$ и $l \rho_\infty V_\infty^2$.

Возмущенный стационарный сверхзвуковой поток справа от решетки тонких профилей в системе координат, связанной с рабочим колесом, содержит слабые скачки уплотнения и волны разрежения, которые в линейном приближении вырождаются в "разрывные" характеристики. Из-за этого те же неоднородности содержит нестационарный поток, набегающий на спрямляющий аппарат. Далее вместо сложного нестационарного течения перед спрямляющим аппаратом рассматривается равномерное стационарное течение с параметрами p_2 , ρ_2 , V_2 и θ_2 , которые получаются осреднением неоднородного нестационарного потока за решеткой, как это обычно делается в теории лопаточных машин. В силу малости возмущений, вносимых вращающейся решеткой, поток перед спрямляющим аппаратом – дозвуковой с параметрами, отличие которых от ρ_∞ , ρ_∞ , V_∞ и $\theta_\infty \equiv 0$ невелико и в рассматриваемом приближении пропорционально X_1 и Y_1 – x - и y -компонентам силы F_1 , действующей на решетку. Дозвуковая скорость и малость угла атаки θ_2 позволяют пренебречь потерями в спрямляющем аппарате (потери на трение не учитываются по постановке задачи). Последний при этом заменяется решеткой изогнутых "пластин" нулевой толщины, поворачивающих поток к оси. Благодаря этому при расчете сил, действующих на спрямляющий аппарат, достаточно пользоваться лишь законами сохранения (по параметрам на входе и выходе) и не заботиться о текущих параметрах потока внутри него.

В рассматриваемой постановке заданное давление в выходном сечении сопла p_3 близко к ρ_∞ . Можно показать, что в линейном приближении X (x -компонента силы F , действующей на всю систему), пропорциональна X_1 (с положительным коэффициентом пропорциональности), Y_1 и разности давлений $\Delta p \equiv p_3 - p_\infty$. Таким образом, при заданных значениях Y_1 и Δp задача о нахождении минимума X эквивалентна задаче о

нахождении минимума силы X_1 , действующей на изолированную решетку. Поэтому результаты по профилированию изолированной решетки, полученные в [1], переносятся и на рассматриваемый случай решетки со спрямляющим аппаратом и соплом.

Таким образом, возникает следующая вариационная задача: при заданных M_∞ , V_τ , τ , Y_1 и давлении p_3 построить такие верхнюю и нижнюю образующие профиля решетки в системе рабочее колесо – спрямляющий аппарат – сопло, чтобы она не возмущала набегающий поток и обладала минимальным сопротивлением, тем самым обеспечивая минимальную потерю импульса во всем канале.

Согласно [1] распределение давления на верхней поверхности нижнего профиля и на переднем участке нижней поверхности верхнего профиля не зависит от условий за решеткой, и определяется лишь отличием угла наклона поверхности профиля ψ от направления набегающего потока, в то время как давление на заднем участке зависит еще и от величины приращения инварианта Римана $i = (I_+^+ - I_1^+) / A$. Здесь

$I^+ = \psi + Ar$ – инвариант Римана, сохраняющийся на C^+ -характеристиках, p – давление, ψ – угол наклона вектора скорости к направлению вектора V_1 , $A = \operatorname{tg} \alpha_1 =$

$= 1/\sqrt{M_1^2 - 1}$; I_+^+ – значение I^+ , приносимое на решетку вдоль C^+ -характеристик, приходящих на решетку справа, I_1^+ – значение I^+ перед решеткой. При фиксированном

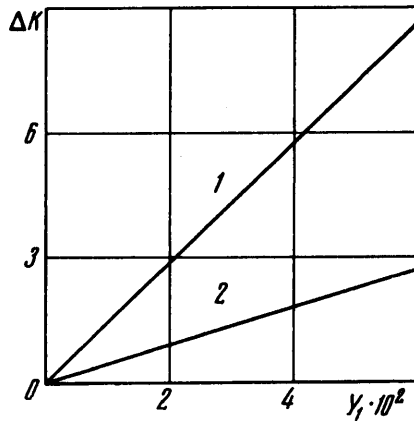
набегающем потоке величина i зависит от параметров течения за решеткой. В случае изолированной решетки ее значение задавалось произвольно (единственное ограничение $|i| \leq k$ – условие применимости линейной теории). Однако в рассматриваемой системе так поступать уже нельзя, так как на параметры потока за решеткой оказывают влияние и сопло, и спрямляющий аппарат. Поэтому, так как x -компонента скорости остается дозвуковой, необходимо задать условие, определяющее режим истечения газа из сопла. Таким условием в работе являлось задание давления в выходном сечении сопла p_3 .

2. Для расчета сил, действующих на решетку в системе, воспользуемся методикой, изложенной в [1]. Кроме того, с помощью этой же методики можно определить величину возмущений, вносимых решеткой в набегающий сверхзвуковой поток и тем самым, после перехода в неподвижную систему координат, найти параметры дозвукового потока на входе в спрямляющий аппарат. Используя законы сохранения расхода, энергии, энтропии и полной энтальпии можно (как уже отмечалось выше) по параметрам на входе в спрямляющий аппарат определить силы, действующие на него и параметры течения за ним. Сечение (высота) сопла подбирается таким, чтобы при заданном давлении на выходе оно пропускало известный расход газа.

В соответствии с результатами [1], рассматривались только те формы образующих профилей решетки, которые, как было там показано, являются оптимальными при различных значениях i и Y_1 . Причем таковыми могут быть как "д-профили", соответствующие двустороннему экстремуму вариационной задачи, так и "к-профили", соответствующие краевому экстремуму, связанному с диапазоном применимости линейной теории.

Приводимые ниже расчеты проведены для $M_\infty = 0,6$, $M_1 = 1,28$, густоте решетки $\tau = 3$ и давлении в выходном сечении сопла $p_3 = p_\infty$. (В этом случае исследуемая система дает тягу.) Для решеток, работающих в режиме компрессора (когда решетка совершает работу над потоком), $i \geq 0$.

Расчеты показали, что для любого значения подъемной силы Y_1 можно построить четырехугольный "д-профиль" с таким значением i , что сопротивление системы X при этом будет меньше сопротивления пластины и "к-профилей", отвечающих другим значениям i при том же самом Y_1 . Причем одному и тому же Y_1 могут соответствовать различные "д-профили" с различными, хотя и довольно близкими i . Выбор наилучшего из них производится путем сравнения отвечающих им значений X .



Фиг. 2

На фиг. 2 вдоль оси абсцисс отложена величина подъемной силы Y_1 , действующей на решетку, а вдоль оси ординат – приращение $\Delta K = (K - K^0) \cdot 10^2$ величины $K = X/Y_1$, обратной "качеству" системы по сравнению с аналогичной величиной $K^0 = X^0/Y_1$, рассчитанной для системы, содержащей решетку пластин при том же значении Y_1 силы, действующей на нее. Согласно определению ΔK кривая 1 на фиг. 2 показывает, насколько полнее подводимая к решетке (за счет вращения венца) работа преобразуется в уменьшение сопротивления ("приращение тяги") рассматриваемой системы оптимальной решеткой по сравнению с решеткой пластин. Кроме того, для сравнения на фиг. 2 приведена кривая 2, аналогичная кривой 1, но построенная для системы без спрямляющего аппарата, т.е. такой, у которой поток в сопле является закрученным. Видно, что система со спрямляющим аппаратом обеспечивает больший выигрыш "качества", чем система без него.

Автор благодарен А.Н. Крайко за руководство и помощь в работе, а также Г.Ю. Степанову за полезное обсуждение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17514).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайко А.Н., Пудовиков Д.Е., Тилляева Н.И. Профилирование решетки, имеющей при сверхзвуковом обтекании с дозвуковой нормальной к фронту решетки компонентой скорости минимальное сопротивление // Изв. РАН. МЖГ. 1995. № 1. С. 137–146.
2. Lichtfus H.J., Starken H. Supersonic cascade flow // Progress Aerospace Sci. Oxford: Pergamon press, 1974. V. 15. P. 37–149.
3. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988. 424 с.

Москва

Поступила в редакцию
16.И.1995