

С. М. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, В. В. ГУЛЯЕВ, М. И. НИШТ

К ИССЛЕДОВАНИЮ ОТРЫВНЫХ РЕЖИМОВ В РЕШЕТКАХ ПРОФИЛЕЙ

(Представлено академиком Л. И. Седовым 14 X 1974)

1. Требования практики во многих случаях приводят к режимам, когда компрессоры работают на углах атаки, близких к критическим. До сих пор отрывные характеристики лопаточных машин удавалось изучать экспериментальным путем (^{1, 2}).

Настоящая работа содержит некоторые из результатов численных исследований на ЦВМ, в которых указанные явления изучались в рамках несжимаемой идеальной среды на основе дальнейшего развития подходов, предложенных в работах (³⁻⁶).

Далее приводятся данные для двух видов тонких профилей: пластин с носовой частью, занимающей $0,45b$ (b — хорда), изогнутой по дуге окружности радиуса $0,64b$, и просто пластин. Каждый профиль в расчетах заменялся десятью дискретными вихрями. Расчетный шаг по безразмерному времени составлял $\Delta\tau=0,1$ ($\tau=u_0t/b$, u_0 — скорость невозмущенного потока, t — время). Изучались решетки профилей с различными значениями относительного шага $\bar{h}=h/b$ и углами геометрического выноса β .

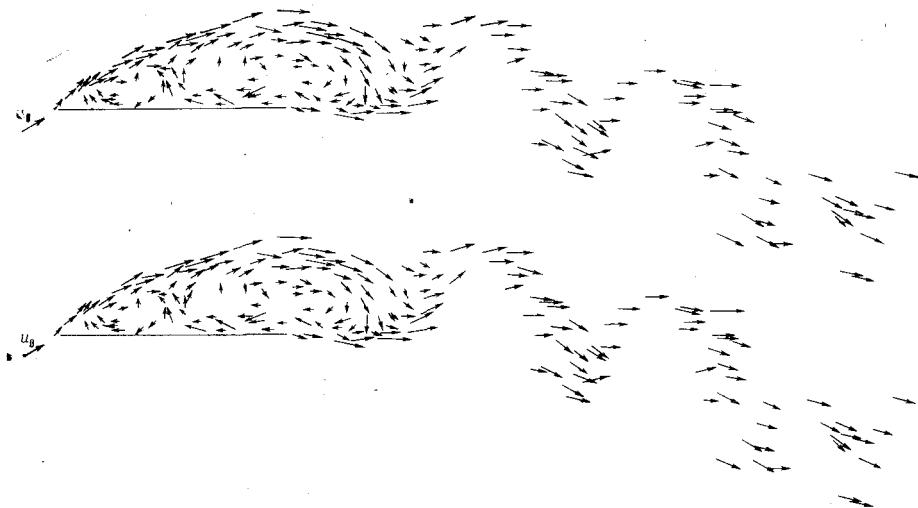


Рис. 1. Поле скоростей вблизи решетки пластин ($\bar{h}=1,0$; $\beta=0$; $\alpha=30^\circ$) при $\tau=6,5$

2. Первая группа задач связана с изучением особенностей отрывных течений, возникающих сразу на всех планах решетки, которые находятся в одинаковых условиях. Отрывные течения рассматривались при различных углах атаки α , причем изучалось равномерное движение решетки, внезапно возникшее из покоя ($\tau < 0$, $u=0$, $\tau \geq 0$, $u=u_0=\text{const}$).

На рис. 1 в масштабе изображено для решетки пластин поле скоростей (в долях u_0), образовавшееся к $\tau=6,5$ при угле атаки $\alpha=30^\circ$ ($\bar{h}=1,0$, $\beta=0$). Здесь предельная картина течения устанавливается раньше, чем на

изолированной пластине (при $\tau > 4$ она периодически повторяется). В межлопаточном пространстве образуется зона, содержащая распавшуюся вихревую пелену, которая затем с течением времени изменяется незначительно. Это приводит к тому, что и аэродинамические нагрузки на профиле в решетке пульсируют менее интенсивно, чем на изолированном (^{4, 5}).

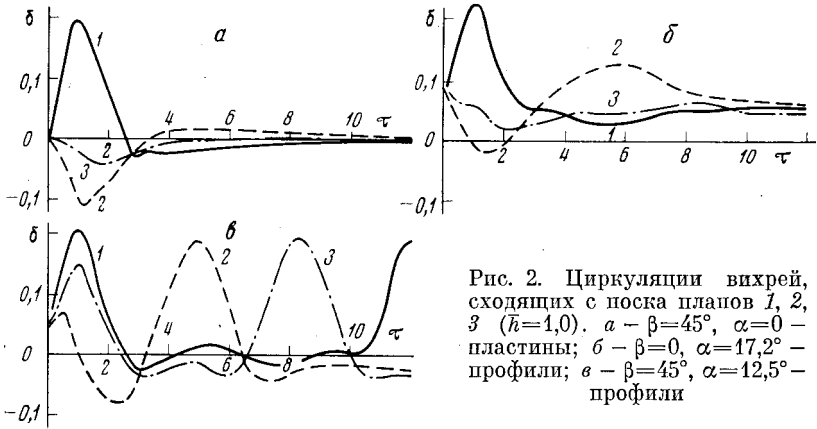


Рис. 2. Циркуляции вихрей, сходящих с носка планов 1, 2, 3 ($\bar{h}=1,0$). а — $\beta=45^\circ$, $\alpha=0$ — пластины; б — $\beta=0$, $\alpha=17,2^\circ$ — профили; в — $\beta=45^\circ$, $\alpha=12,5^\circ$ — профили

Был изучен случай, когда при $\tau=0$ решетка начинает двигаться с постоянной скоростью u_0 , параллельной фронту. Переходный процесс здесь продолжается лишь до $\tau=1,5-2,0$, после чего коэффициент нормальной силы C_n периодически меняется вблизи нуля. Решетка при своем движении захватывает жидкость, находящуюся в межлопаточном пространстве, и образуется течение, близкое к застойному. Среднее по времени значение коэффициента C_n равно нулю.

3. Для изучения динамики развития срыва рассматривались решетки, у которых профили находились в различных условиях. Исследовалось влияние геометрических параметров и нагруженности решеток. За исходное брали стационарное обтекание решетки тонких профилей, находящихся в одинаковых условиях, причем по передним кромкам обеспечивался безударный вход потока. Этот режим является безотрывным (носовая пелена отсутствует). У решетки пластин он имеет место при скорости u_0 , параллельной хордам (решетка не нагружена, $C_n=C_{n0}=0$). Для нагруженных решеток исходное течение было получено на планах с изогнутым носком за счет подбора угла атаки при каждом \bar{h} и β . Значения α (по хорде, соединяющей носик и хвостик) и стационарного значения коэффициента нормальной силы C_{n0} приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	\bar{h}	$\beta=0$	$\beta=15^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=60^\circ$
α	0,5	23°,3	22°,5	21°,3	19°,3	15°,7
	1,0	17,2	16,3	14,8	12,5	9,0
C_{n0}	0,5	0,451	0,430	0,432	0,457	0,506
	1,0	0,732	0,701	0,705	0,740	0,815

Пусть номера профилей по порядку будут 1, 2, 3, 4, Каждый из них с номерами 1, 4, 7, ... был плавно повернут во время $0 \leq \tau \leq 3$ на $\Delta\alpha = 20^\circ$ и возвращен в исходное положение. В процессе поворота и далее изучали развитие срыва на всех профилях: наблюдали за картиной обтекания (главным образом, положением вихревой пелены), исследовали зависимость от времени безразмерной циркуляции первого дискретного вихря в пелене $\delta(\tau)$ ($\Gamma_-(\tau) = u_0 b \delta(\tau)$) и изменение коэффициента $C_n(\tau)$.

Поворот планов во всех случаях сопровождается появлением на них отрывного течения, которое характеризуется сходом носовой пелены и интенсивным изменением C_n . Затем отрыв перемещается на соседние планы в сторону проекции u_0 на фронт решетки ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$). Первый этап переходного процесса ($0 \leq \tau \leq 3$) в качественном отношении был одинаков для всех

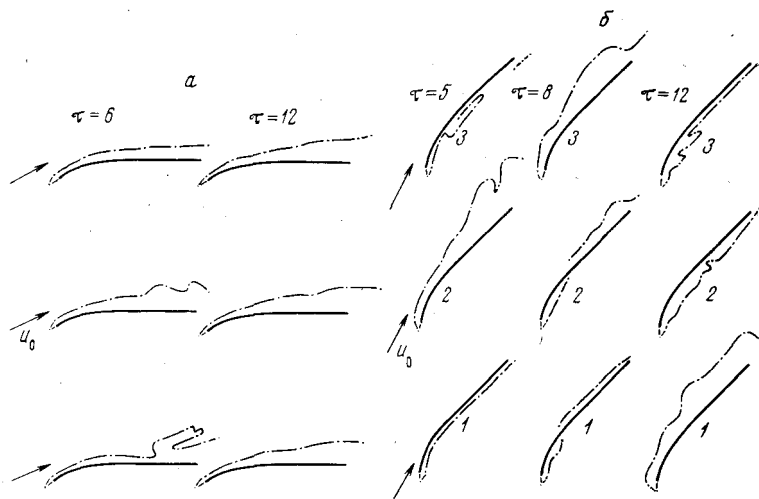


Рис. 3. Динамика развития носовой пелены (решетка профилей, $\bar{h}=1,0$). $a - \beta=0, \alpha=17,2^\circ$; $b - \beta=45^\circ, \alpha=12,5^\circ$

рассмотренных вариантов (рис. 2 и 3). Однако предельные режимы, получающиеся при больших τ , существенно зависят от нагруженности и геометрических параметров.

Были установлены следующие основные виды предельных течений.

Режим I — плавное обтекание. Имеет место на ненагруженных решетках, у которых в исходном состоянии интенсивность присоединенных

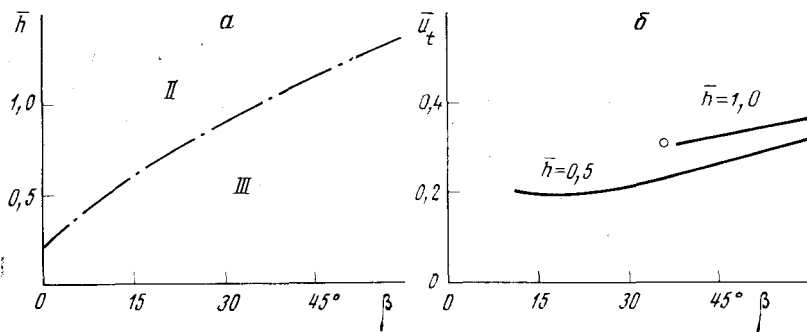


Рис. 4. Основные характеристики перемещающегося отрыва: a — геометрические параметры, при которых были получены режимы II и III ; b — относительная скорость перемещения отрыва $\bar{u}_t = u_t / u_{0t}$ (кружок — эксперимент ⁽²⁾ при $\bar{h}=0,85, \beta=35^\circ$)

вихрей равна нулю. Свободные вихри, образовавшиеся при повороте планов, довольно быстро уносятся потоком, и при $\tau=6-8$ все характеристики возвращаются к исходным стационарным значениям (рис. 2а).

Режим II — устойчивый, почти стационарный отрыв. Наблюдался у нагруженных решеток при малых значениях β или больших \bar{h} (рис. 4а). Динамика развития такого срыва показана на рис. 2б и 3а. К $\tau=8-10$ здесь создаются условия, когда вихревая пелена на всех планах принима-

ет почти одинаковое положение, интенсивность ее со временем изменяется незначительно и срыв стабилизируется. Нормальная сила на планах, хотя и не возвращается к стационарным значениям, но пульсирует сравнительно незначительно.

Режим *III* — перемещающийся отрыв. Получается у нагруженных решеток при больших β или малых \bar{h} (рис. 4а) и имеет наиболее сложную динамику развития (рис. 2в и 3б). Области отрыва возникают как на одной, так и на другой стороне планов, при переходах наблюдается разрыв пелены (рис. 3б). Отрыв не стабилизируется, а периодически перемещается с плана на план ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \dots$). Нормальная сила на планах также меняется с тем же периодом, причем пульсации ее значительны.

Безразмерная скорость распространения отрыва вдоль фронта решетки $\bar{u}_t = u_t / u_{0t}$ (u_{0t} — проекция u_0 на фронт решетки) наиболее точно определяется по зависимостям $\delta(\tau)$. На рис. 4б даны значения ее для тех \bar{h} и β , при которых имел место режим *III*.

Поступило
9 X 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. А. Борисов, Е. А. Локшанов, Л. Е. Ольштейн, Вращающийся срыв в осевом компрессоре, Промышленная аэродинамика, в. 24, 1962. ² В. Н. Ершов, Неустойчивые режимы турбомашин, 1966. ³ С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, Мех. жидкости и газа, № 3 (1972). ⁴ С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, Там же, № 5 (1973). ⁵ С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, ДАН, т. 243, № 4 (1973). ⁶ С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, ДАН, т. 246, № 6 (1974).