

УДК. 621.515

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЫВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Коваль В. А.

В практике проектирования осевых компрессоров ГТД для определения границы срыва применяются критерии, связанные с предельной степенью торможения одномерного потока в плоских решетках профилей, эквивалентных плоским и круглым диффузорам.

Надежность применения штатных критериев для определения начала срыва продемонстрирована на примере КВД одного из современных отечественных двигателей (рис. 1). Все критерии поименованы здесь как K_i , а разброс их на одном из режимов по ступеням представлен в виде $R_i = (K_i - K_{i\text{пред}}) / K_{i\text{пред}}$. Видно, что разброс величин R_i для каждой ступени весьма значителен.

Причина такого разброса связана с "размазыванием" особенностей сложного пространственного течения в пограничном слое на предсрывных режимах. Очевидным является факт, что дальнейшее повышение точности оценки срывных режимов должно быть связано с разработкой новых критериев, основанных на интегральных параметрах профильного и торцевого пограничного слоя. Эти критерии можно применять для различных сечений по высоте лопатки при соответствующих местных условиях течения, найденных на основе современного метода решения прямой задачи турбомашин. Вычисления должны показать не работает ли какое-нибудь сечение в критических условиях /1/.

На основании, расчетно-теоретических и экспериментальных исследований (опубликованы автором в многочисленных специальных

изданиях) предложен новый подход к оценке границы вращающегося срыва и типа срывных зон в момент их возникновения (полный и частичный срыв).

С помощью нового решения вариационной задачи о форме движения рабочего тела в компрессорной ступени при максимуме потока механической энергии [2] получено условие нарушения устойчивости движения в виде

$$\frac{\partial^2 (H C_a)}{\partial C_a^2} \leq \frac{\tau}{1 - \tau H_{1,2} \delta_t^{****} - \tau \delta_t^{****}} \left\{ 2 \frac{\partial (H C_a)}{\partial C_a} \left[\frac{\partial \delta_t^{****}}{\partial C_a} (H_{1,2} + 1) + \frac{\partial H_{1,2}}{\partial C_a} \delta_t^{****} \right] + H C_a \left[\frac{\partial^2 \delta_t^{****}}{\partial C_a^2} (H_{1,2} + 1) + 2 \frac{\partial H_{1,2}}{\partial C_a} \frac{\partial \delta_t^{****}}{\partial C_a} + \frac{\partial^2 H_{1,2}}{\partial C_a^2} \delta_t^{****} \right] \right\} \quad (1)$$

где τ - густота решетки; δ_t^{****} толщина потери энергии профильного пограничного слоя; $H_{1,2} = \delta^* / \delta^{****}$ - формпараметр; H - напор элементарного сечения; C_a - расходная составляющая скорости на данном радиусе.

При неучете особенностей формирования пограничного слоя по высоте лопатки в осесимметричной постановке ($\delta_t^{****} = 0$) уравнение (1) сводится к условию $\partial^2 (H C_a) / \partial C_a^2 = 0$, полученное В.Н. Ершовым [3].

На рис. 2. показано решение соотношения (1) для модельной ступени С-14. Здесь же показан и момент потери устойчивости в элементарных сечениях, найденный с помощью условия $\partial^2 (H C_a) / \partial C_a^2 = 0$. В обоих случаях устойчивость движения нарушается вначале у корневых сечений. В то же время опыты по-

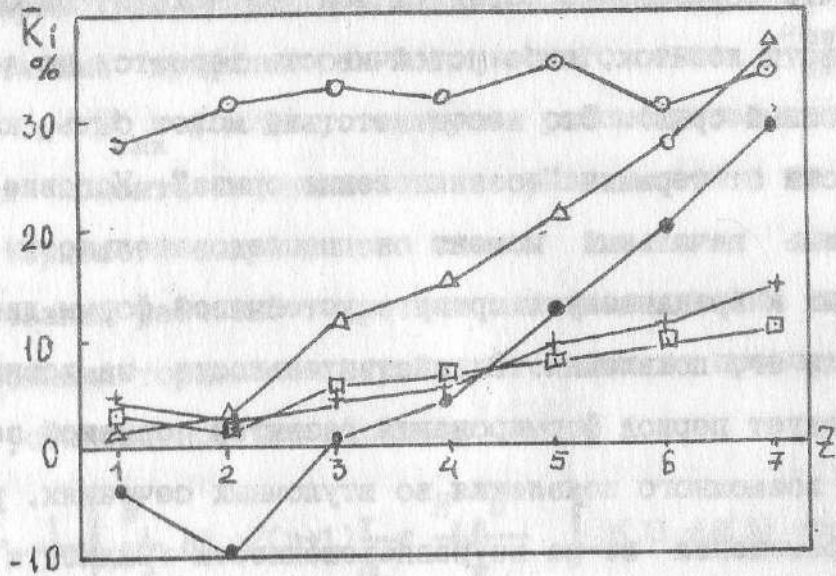


Рис. 1

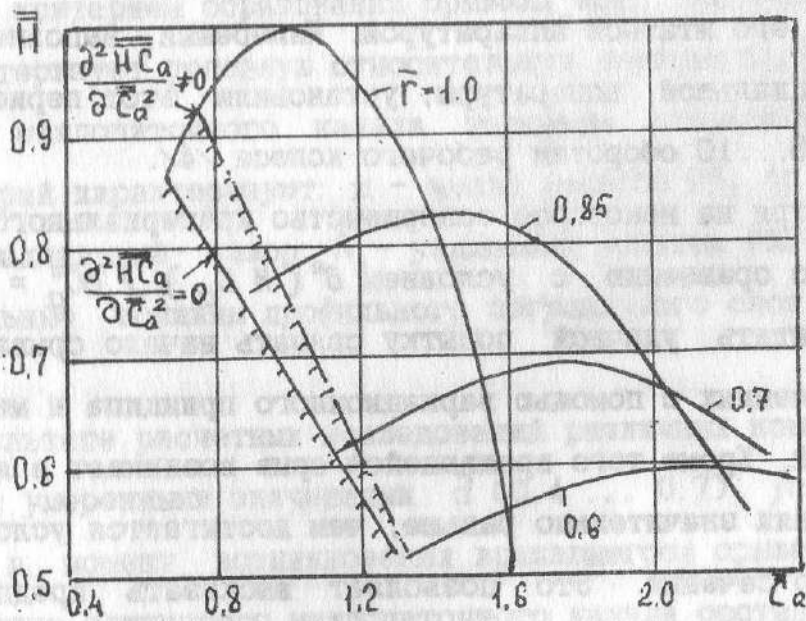


Рис. 2

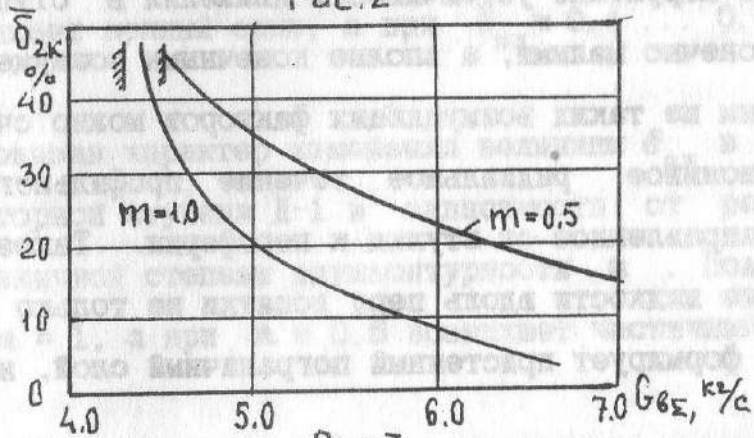


Рис. 3

казали, что образование срывных зон происходит либо в периферийной части лопаток, либо устойчивость теряется по всей высоте венца (полный срыв). Это несоответствие может быть кажущимся в зависимости от термина "возникновение срыва". Условие определяет (1) лишь начальный момент в последовательности событий, приводящих к вращающемуся срыву - устойчивой формы движения потока после его появления. В действительности за возникновением срыва следует период формирования развитой срывной зоны от момента ее возможного появления во втулочных сечениях, радиального ее перемещения из-за неуравновешенности градиента давления к концам лопаток до момента стабилизации срывного течения и фиксации его штатной аппаратурой. Измерения, выполненные с помощью специальной аппаратуры, установили этот период соответствующий 6...10 оборотам рабочего колеса /4/.

Несмотря на некоторое совершенство критериального соотношения (1) по сравнению с условием $\partial^2 (H C_a) / \partial C_a^2 = 0$, все же нельзя считать удачной попытку связать начало срыва в элементарных сечениях с помощью вариационного принципа и метода малых возмущений. Кроме того вращающийся срыв возникает в исследованных ступенях значительно раньше, чем достигается условие (1) в каком-либо сечении. Это позволяет высказать предположение о том, что нарушение устойчивости движения в ступени вызывается не бесконечно малыми, а вполне конечными возмущениями.

Одним из таких возмущающих факторов можно считать достаточно интенсивное радиальное течение профильного пограничного слоя, направленное от втулки к периферии. Такое поперечное перемещение жидкости вдоль пера лопатки не только соответствующим образом формирует пристенный пограничный слой, но и вносит воз-

мушения в основную часть потока. Поэтому в дополнение к критерияльным параметрам срывных режимов, связанных с интегральными характеристиками профильного пограничного слоя $\delta_{\max}^{***} = 1.0$, $H_{1,2} = 1.0$ и $D_{\max} = 1$ [2], следует рассмотреть возможность определения момента возникновения срывных зон и их тип по критериям торцевого пограничного слоя.

На основании расчетно-теоретических исследований особенностей формирования торцевого пограничного слоя на предсрывных режимах [5] установлено, что параметр

$$\delta_{\text{ак}} = \frac{\delta_{\text{ак}}}{h_2} = \frac{1}{\Gamma_{2\text{к}}} \left[\frac{W_1}{W_2} \Delta\Gamma + 2(n+1) \frac{\Gamma}{h_2} z \frac{H_{1,2} \delta^{***}}{W_2} \int_0^1 W(x) \Delta\theta(x) dx \right] \quad (2)$$

может быть критерием образования срывных зон. Выражение (2) по сути характеризует условную относительную степень загромождения единичного межлопаточного канала торцевым пограничным слоем. Этот критерий характеризуют: z - число лопаток РК; $\Delta\Gamma$ - относительный радиальный зазор; h_2 - удлинение лопаток РК; $H_{1,2} \delta^{***}$ - интегральные толщины профильного пограничного слоя у периферии РК.

В результате расчетных исследований различных компрессорных ступеней с умеренными значениями \bar{a} (0.4 ... 0.7) установлено, что если в момент возникновения вращающегося срыва указанное загромождение единичного межлопаточного канала составляет более 80 %, то возникает полный срыв, а при $\delta_{\text{ак}} \approx 0.4 \dots 0.5$ - частичный срыв.

На рис. 3 показан характер изменения величины $\delta_{\text{ак}}$ в двухконтурной вентиляторной ступени Д-1 в зависимости от режима по расходу при различной степени двухконтурности m . Полный срыв соответствует $m = 1$, а при $m = 0.5$ возникает частичный вращающийся срыв.

Момент образования срывных зон с параметрами торцевого пограничного слоя однозначно связать не удалось. Однако учитывая резкий рост величины δ_{zk} в ступенях с полным срывом вблизи границы срыва, можно считать параметр $\delta_{zk} = 0.4 \dots 0.5$ является критериальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейцер. Явление срыва потока в осевых компрессорах (обзор) // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. общества инженеров-механиков, 1980, №2, с.72-97.
2. Ершов В.Н., Коваль В.А. Модель течения в ступени осевого компрессора на предсрывных режимах / Изв. вузов. Авиационная техника, 1987, №1, с.39-44.
3. Ершов В.Н. Неустойчивые режимы турбомашин. -М.: Машиностроение, 1966. -179 с.
4. Джексон. Развитие срывной зоны в осевом компрессоре // Энергетические машины и установки: Тр. Амер. общества инженеров-механиков, 1988, №4, с.24-33.
5. Коваль В.А., Ковалев В.И. Математическое моделирование торцевых течений в ступени осевого компрессора на предсрывных режимах // Авиационно космическая техника и технология: Тр. ХАИ, Харьков, 1996, с.77-83.