

УДК 621.45.037.015.2.533.6.013.4

**ИЗМЕНЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В КОМПРЕССОРАХ,  
ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЕ НАРУШЕНИЮ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ.  
ЭКСПЕРИМЕНТ**

© 2011 г.

*Н.Н. Ледовская*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

krashenin@ciam.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

На основании экспериментального исследования нестационарной структуры потока в моделях ступеней различного назначения для компрессорных узлов современных ТРДД обнаружено при подходе к границе газодинамической устойчивости физическое явление, характеризующееся: 1) формированием вследствие отрыва окружной неоднородности потока, вращающейся вместе с колесом; 2) перераспределением энергии пульсаций при уменьшении расхода воздуха в полосу частот  $\Delta f = 0 - f_{\text{рот}} Z_{\text{рк}}$ . Получен признак для опережающей диагностики приближения к границе устойчивости.

*Ключевые слова:* компрессор, нестационарная структура потока, пульсации давления, спектральный анализ, газодинамическая устойчивость.

Анализ имеющихся результатов экспериментального исследования нестационарной структуры потока в компрессорах показал, что при уменьшении расхода воздуха через компрессор при одной и той же частоте вращения в рабочем колесе постепенно теряется устойчивость течения, что проявляется в дестабилизации течения в межлопаточных каналах рабочего колеса компрессора. В этом случае происходит изменение пульсаций давления, измеряемых на стенке над рабочим колесом. Датчики пульсаций показывают, что одновременно с изменением высокочастотной части спектра, проявляющимся в увеличении амплитуды гармоники частоты следования лопаток  $A_{n1}$  и кратных ей частот  $A_{n2}, A_{n3}, \dots, A_{ni}$ , возрастает среднеквадратичное отклонение давления в широкой полосе частот  $f = 0 - 40$  кГц. Предварительный анализ измеренных нестационарных параметров на входе в ступени показал, что в проточной части наблюдается пульсирующая окружная и радиальная периодические неоднородности потока. Окружная неоднородность, вращающаяся вместе с колесом, описывается гармониками на частотах следования лопаток, а также роторными гармониками в низкочастотной части спектра. Интенсивность окружной неоднородности изменяется в зависимости от режима работы по частоте вращения и расходу воздуха. При приближении к границе устойчивости она усиливается при всех частотах вращения. Одновременно меняется спек-

тральный состав пульсаций давления в полосе частот  $\Delta f = 0 - f_{\text{рот}} Z_{\text{рк}}$ . Из-за изменения структуры и увеличения интенсивности окружной неоднородности потока обтекание лопаток в соседних межлопаточных каналах происходит по-разному, и структура потока в каналах разная. Различие усиливается по мере уменьшения расхода потока и приближения к границе устойчивости. При этом изменяется спектральный состав пульсаций во всем широком диапазоне частот. Происходит перераспределение энергии пульсаций в низкочастотную область спектра.

Эти данные получены при испытании большого числа модельных ступеней различного назначения. Анализ структуры течения в каналах периферийных сечений показал, что в оптимальных по эффективности режимах работы ступени течение в каждом межлопаточном канале «квазистационарно», то есть слабо изменяется по времени, но сильно различается в окружном направлении. При этом имеет место изменение по шагу решетки РК значений угла  $\beta_1$ , например в ступени – модели одноступенчатого вентилятора, в оптимальной точке характеристики при окружной скорости, близкой к расчетной, это изменение может составить до  $35^\circ$ , в соответствии с изменением по шагу измеренной осевой скорости потока (рис. 1). Периодичность течения, наблюдавшаяся в оптимальной точке характеристики, вблизи границы устойчивости изменяется.

По результатам проведенных исследований в

качестве критерия для распознавания указанных процессов предложен параметр  $\Pi$ , характеризующий повышение интенсивности пульсаций давления, являющихся следствием образования окружной неоднородности во вращающихся лопаточных колесах. Для его формирования анализируются пульсационные характеристики потока в полосе частот  $\Delta f = 0 - 1/2 f_{\text{рот}} Z_{\text{рк}}$ , определенные в оптимальной точке характеристики и вблизи границы устойчивости соответственно.

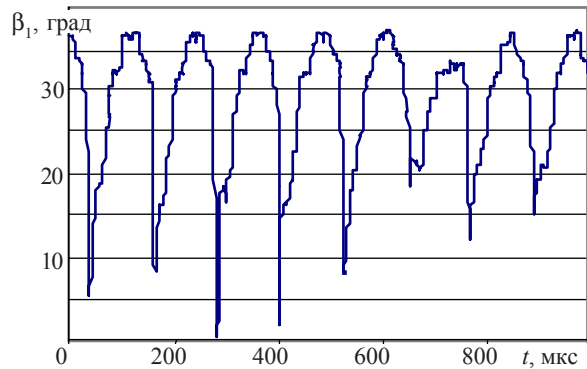


Рис. 1

В качестве примера на рис. 2 показано формирование окружной неоднородности потока вблизи границы устойчивости на расчетной окружной скорости в ступени, являющейся моделью последней ступени КВД. На рисунке показаны временные реализации пульсаций перепадов полного и статического давлений перед и за ступенью, измеренных синхронно за период  $t = 3T_{\text{рот}}$  до возникновения неустойчивости. Как показали исследования, проведенные на моделях типовых ступеней компрессора и натуральных объектах, значения параметра

$$\Pi = \sum_0^{0.5 \text{fnz}} A_i / \sum_0^{0.5 \text{fnz}} A_{i \text{opt}}$$

при приближении к границе нарушения газодинамической устойчивости увеличиваются в 2–5 и более раз в зависимости от близости режима к границе устойчивости.

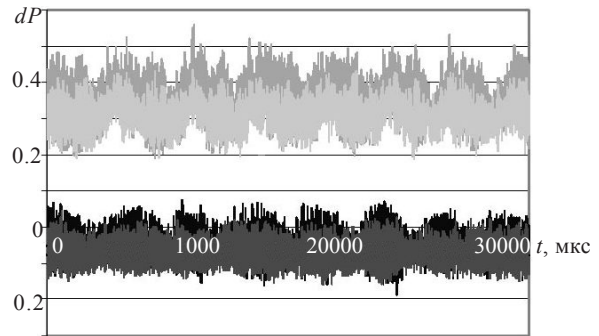


Рис. 2

Определение параметра  $\Pi$  основывается на физическом явлении, развивающемся до возникновения неустойчивости течения. Одним из показателей является окружная неоднородность потока, появляющаяся вследствие отрыва потока в РК, вращающаяся с ним и трансформирующаяся при фиксированной частоте вращения по мере изменения расхода воздуха.

Использование параметра  $\Pi$  как диагностического признака приближения к границе устойчивости обеспечивает предотвращение возникновения вращающегося срыва и помпажа. Пороговое значение сигнала управления является функцией частоты вращения рабочего колеса и приведенной осевой скорости потока на входе и определяется в условиях устойчивой работы компрессора. Новизна подхода к диагностике границы газодинамической устойчивости подтверждается патентом РФ №2354851 «Способ контроля режимов работы компрессора и устройство для его осуществления».

## THE CHANGE OF UNSTEADY FLOW PATTERN IN COMPRESSORS BEFORE THE OCCURRENCE OF GAS-DYNAMIC INSTABILITY. EXPERIMENT

*N.N. Ledovskaya*

The experimental investigation of an unsteady flow pattern in the models stages of various purpose for the compressor assemblies of modern turbofans has revealed, when approaching the surge line, a physical phenomenon which is characterized by: 1) forming, as a result of separation, of a non-uniformity of the circumferential flow rotating together with the wheel; 2) redistribution of pulsation energy with the decrease of the air flow to the frequency band  $\Delta f = 0 - f_{\text{wh}} Z_{\text{wh}}$ . The symptom has been obtained and proposed for early diagnostics of the approaching surge threshold.

*Keywords:* compressor, unsteady flow pattern, pressure pulsation, spectrum analysis, gas dynamic stability.