

УДК 621.44.533.697

В.М. ЛАПОТКО, Ю.П. КУХТИН

Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Украина  
(Запорожье, E-mail: 03504@ivchenko-progress.com)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМА НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА ГАЗА В СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА

С использованием метода отслеживания струй тока проведены численные исследования 2–d нестационарного течения газа в ступени компрессора с учетом вязкости. Наряду с существованием высокочастотного режима колебаний нестационарного потока газа, обусловленного неравномерностью потока газа в следах лопаток, обнаружено наличие низкочастотного режима колебаний, обусловленного автоколебаниями скачков уплотнения в направляющем аппарате ступени.

**биротативный вентилятор, абсолютная система координат, нестационарное взаимодействие, низкочастотные колебания потока**

### Введение

Трансзвуковые движения рабочей среды в турбомашине характеризуются возникновением местных сверхзвуковых зон, скачков уплотнения большой интенсивности. В результате сложного взаимодействия скачков уплотнения с пограничными слоями неподвижных и вращающихся поверхностей образуются срывные, турбулентные зоны.

Создание надежно работающих компрессоров и турбин невозможно без детального изучения нестационарных явлений в отдельных ступенях.

Предметом исследования, результаты которого изложены в настоящей работе, являлся экспериментальный, закапотированный, биротативный вентилятор (БВ) с короткими, слабо закрученными лопатками, изображенный на рис. 1, 2.

Профили лопаток обоих колес были одинаковы,  $B = 131$  мм. Обороты вращения роторов  $n_1 : n_2 = 6545.0 : 6455.0$  об/мин. Соотношения чисел лопаток – 29/31. Параметры, определяющие режим его работы, были следующие:  $P_{in} = 85446$  Па;  $\beta = 40^\circ$ ;  $P_a = 85446$  Па;  $T_a = 288$  К. Величины  $P_w^0$ ,  $T_w^0$  соответствовали определенному числу Маха на входе в расчетную область из диапазона  $M_{in} = 0,65 \div 0,85$ .

Газовая постоянная и коэффициент адиабаты равны соответственно 288 дж/кг К и 1,4.

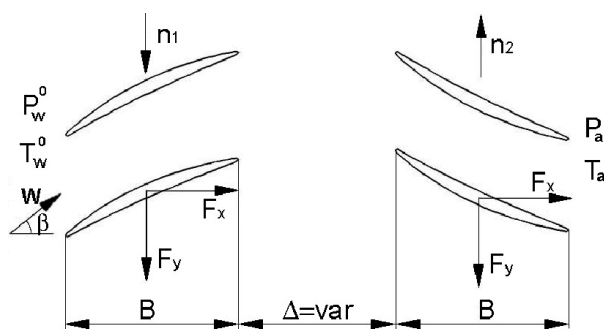


Рис. 1. Развертка срединной поверхности

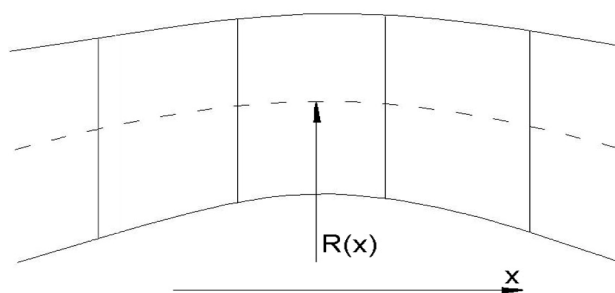


Рис. 2. Конфигурация тракта

В качестве инструмента исследования авторы использовали метод отслеживания струй тока (МОСТ), позволяющий в практике КБ проводить

многовариантные исследования 2-d нестационарных течений газа в слое переменной толщины на переменном радиусе [1].

В процессе этих исследований, отдельные локальные свойства численных решений возможно будут определены недостаточно точно, однако только в такой упрощенной постановке можно получить общие характеристики сложных течений. Авторы полагают, что локальные, неучтенные свойства течений не будут заметно сказываться на общих характеристиках явления в целом.

### 1. Результаты исследований

Расчетная область, фрагмент которой изображен посредством «грубой» сетки на рис. 3, состояла из двух полных лопаточных венцов. Исследования проводились в относительной системе координат, связанной с первым венцом. В такой системе координат ступень биротативного вентилятора можно рассматривать как обычную ступень: НА-ПК, рассчитанную в абсолютной системе координат с  $\omega_{PK} = \omega_{1PK} + \omega_{2PK}$ .

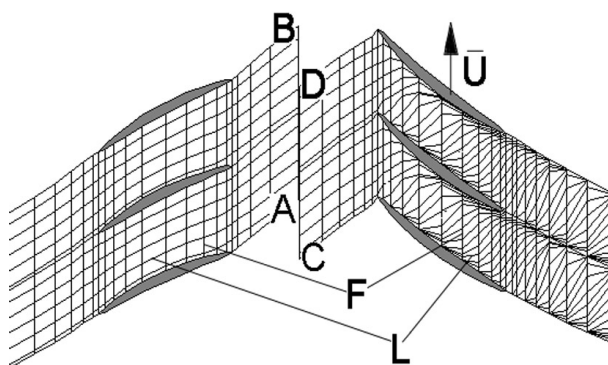


Рис. 3. Расчетная сетка на окружной развертке срединной поверхности тока

Все параметры течения приводились к безразмерному виду. В качестве эталонов давления и температуры принимались параметры  $P_a$  и  $T_a$  на выходе из ступени. Эталонном скорости служила изотермическая скорость звука, определенная по параметрам

на выходе из ступени. За единицу длины принималась осевая протяженность расчетной области – 560 мм.

На рис. 3 показана особенность прохождения струй среды через решетку рабочего колеса. Видно, что вышедшие из направляющего аппарата струи фрагментируются или расщепляются на отдельные сегменты, которые располагаются между соседними лопатками и их спутными струями. В процессе прохождения отдельными сегментами струй межлопаточных каналов происходит их деформация и переориентация в пространстве. Изменение ориентации сегментов в пространстве обусловлено различной скоростью движения их носовой и хвостовой частей по ограничивающим поверхностям, которыми являются корыто и спинка профиля.

Деформация сегментов струй – изменение их формы – обусловлено инерционностью среды, а, следовательно, перетеканием среды от хвостовой части сегмента к носовой части. Таким образом, рабочие лопатки, расположенные ниже по потоку, расщепляют струи на сегменты и переориентируют эти сегменты таким образом, что они не объединяются на выходе из межлопаточного канала.

Но наиболее примечательным свойством, полученным расчетным путем нестационарного течения, являлось существование в определенном диапазоне чисел Маха набегающего потока  $M_{kp} = 0,7 \div 0,82$  при заданном числе Рейнольдса  $9,165 \cdot 10^6$  низкочастотного режима колебаний (рис. 4). Направление течения газа между венцами ступени изменялось за период колебаний  $\approx$  на  $15^\circ$ . Частота таких колебаний составляла 94 Hz при относительной частоте вращения второго венца 200 Hz.

Причиной возникновения низкочастотных колебаний потока являлся режим автоколебаний, в который попадали скачки уплотнения, образующиеся в межлопаточных каналах первой решетки.

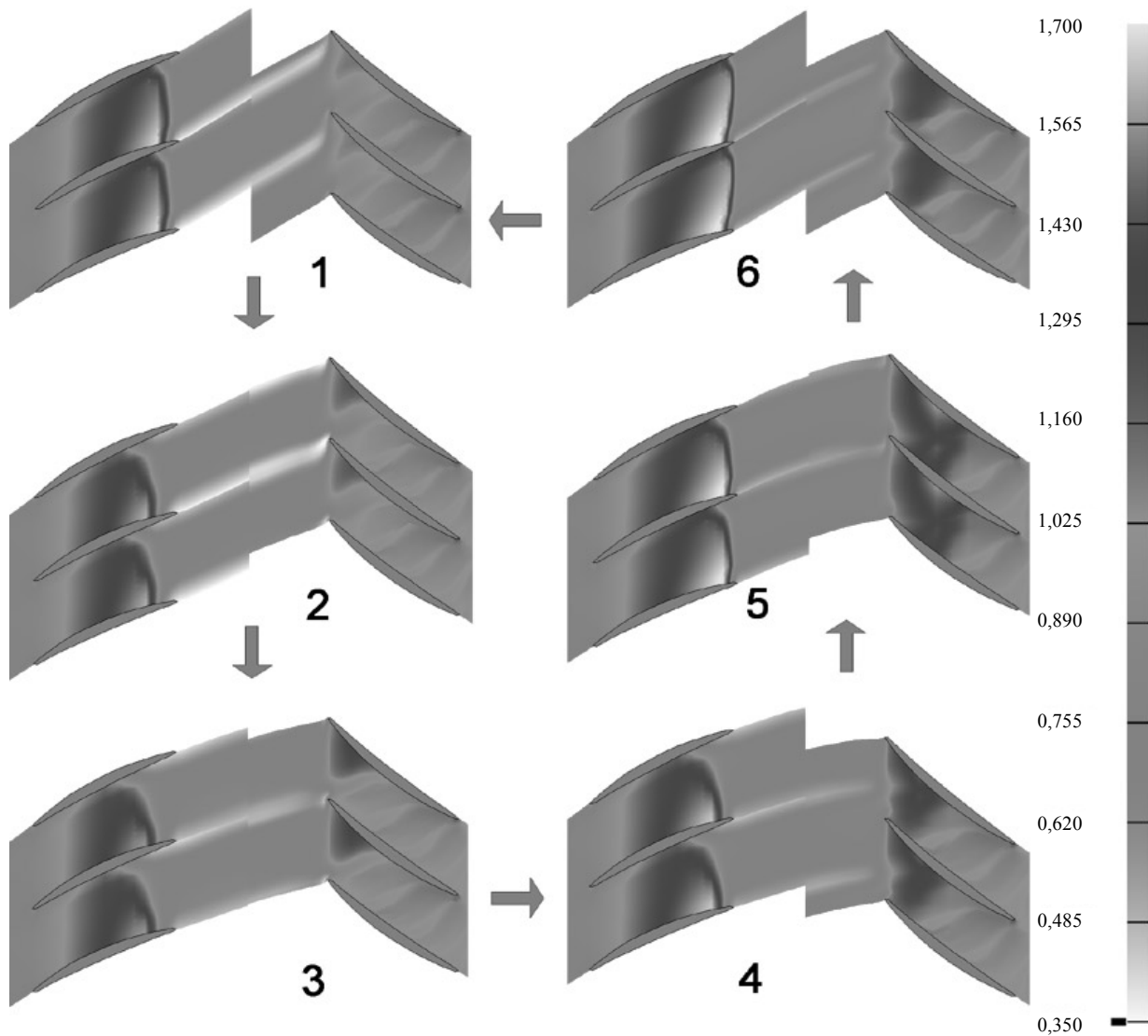


Рис. 4. Цикл автоколебаний скачков уплотнения в ступени компрессора; поле безразмерного параметра скорости  $M$

В начале рассматриваемого периода колебаний скачки уплотнения находились в крайнем правом положении на выходе из лопаточных каналов (рис. 4, поз. 6). Далее наблюдалось движение сильных скачков уплотнения ( $M \approx 1,7$ ) вверх по потоку к середине профиля (рис. 4, поз. 1, 2). При этом точки падения скачков уплотнения на корыто профиля двигались с большей скоростью по отношению к скорости точек падения на спинку профиля. В результате чего происходил разворот скачков уплотнения в пространстве, что вызывало изменение угла

потока газа на входе во второй лопаточный венец. Перемещающиеся вверх по потоку скачки уплотнения инициировали отрыв пограничного слоя как у основания скачков уплотнения, так и в точках падения их на поверхности соседних лопаток. В оставшееся время периода колебаний, ослабленные скачки уплотнения ( $M \approx 1,4$ ), из крайнего левого положения (поз. 3) возвращались (рис. 4, поз. 4, 5) в исходное правое положение (рис. 4, поз. 6). В это время наблюдалось присоединение оторвавшегося потока к поверхностям лопаток.

На рассмотренные низкочастотные колебания среды в осевом зазоре накладывались высокочастотные колебания, обусловленные аэродинамическими следами, сошедшими с лопаток первой решетки. Для

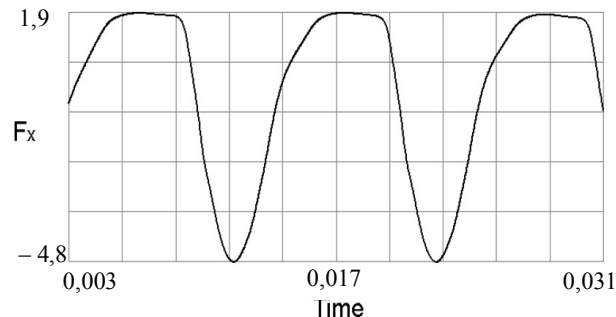


Рис. 5. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку первого венца БВ,  $M_{крH} < M_{in} < M_{крB}$

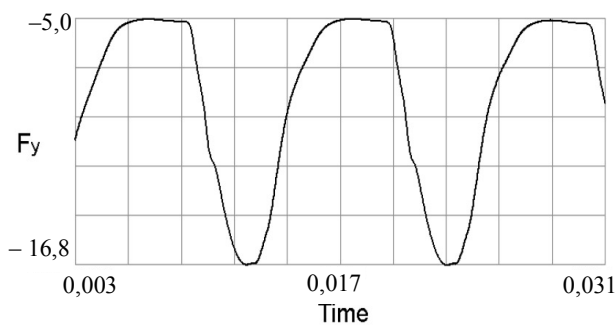


Рис. 6. Окружная нестационарная сила, действующая на лопатку первого венца БВ,  $M_{крH} < M_{in} < M_{крB}$

Согласно результатам расчетов низкочастотные колебания скачков уплотнения возникали синхронно на всех лопатках первой решетки при однородных краевых условиях на входе и выходе расчетной области. Эта синхронность могла быть нарушена при возникновении некоторой окружной асимметрии параметров на входе в расчетную область, например, в поле полного давления или на выходе из расчетной области в поле статического давления. После снятия возмущения асинхронность колебаний сохранялась при сохранении частоты и фазы колебаний.

В режиме течения, для которого число Маха на входе в расчетную область меньше числа Маха

режима низкочастотных колебаний скачков уплотнения характерны эпоры нестационарных сил существенной амплитуды и низкой частоты, действующих на лопатки обеих решеток (рис. 5 – 8).

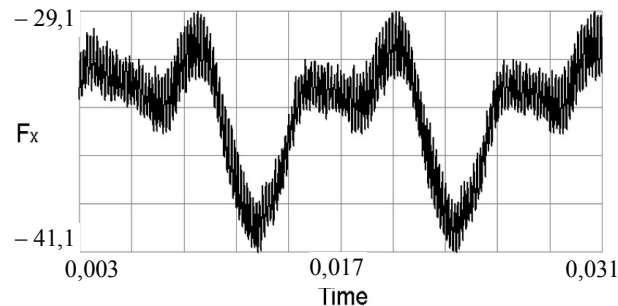


Рис. 7. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ,  $M_{крH} < M_{in} < M_{крB}$

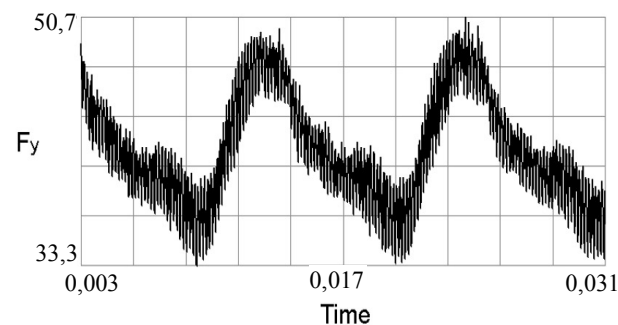


Рис. 8. Окружная нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ,  $M_{крH} < M_{in} < M_{крB}$

нижней границы автоколебаний, в первой решетке лопаток устанавливался полностью дозвуковой режим течения. На профиль лопатки этого венца действовали постоянные газодинамические силы. Эпоры нестационарных сил, действующих на лопатки второго венца (представлены на рис. 9, 10) характеризовались только высокочастотными колебаниями, обусловленными следовой неравномерностью параметров на входе в венец.

При числах Маха на входе в расчетную область, больших числа Маха верхней границы автоколебаний, скачок уплотнения располагался за лопатками первой решетки в осевом зазоре ступени. Его положение и интенсивность практически

не менялись во времени. Как и для режима течения  $M_{in} < M_{крН}$ , на профиль лопаток первого венца действовали постоянные силы. Эпюры нестационарных сил, действующих на лопатки второй

решетки, представлены на рис. 11, 12. Для них также характерен высокочастотный режим колебаний, возбуждаемый следовой неравномерностью потока.

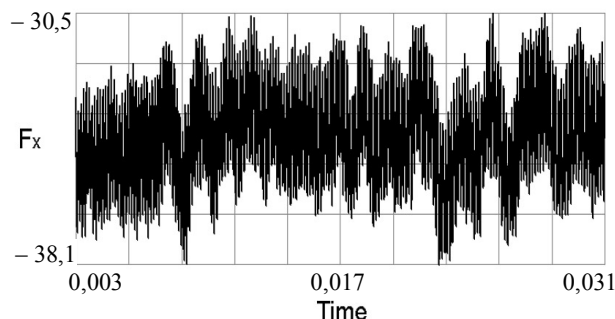


Рис. 9. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ для  $M_{in} < M_{крН}$

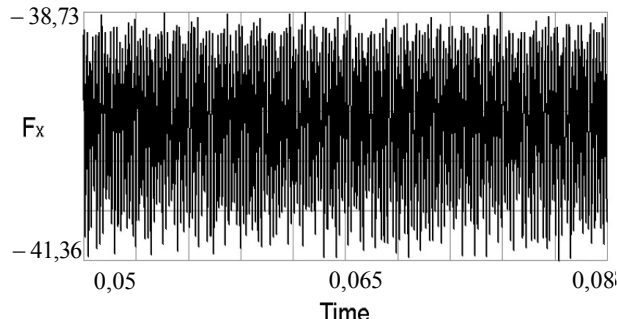


Рис. 11. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ для  $M_{in} > M_{крВ}$

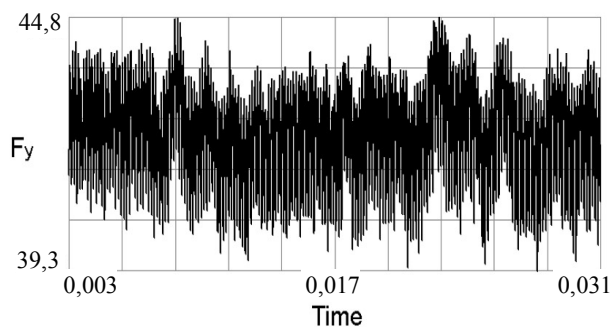


Рис. 10. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ для  $M_{in} < M_{крН}$

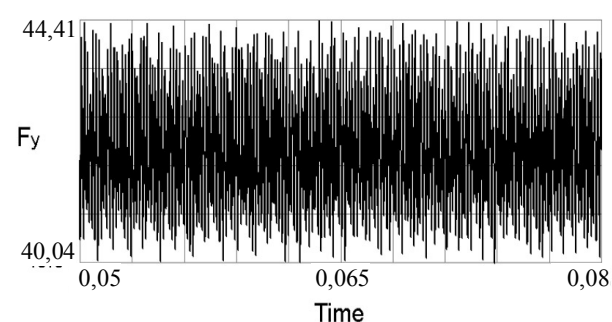


Рис. 12. Осевая нестационарная сила, действующая на лопатку второго венца БВ для  $M_{in} > M_{крВ}$

Был проведен численный эксперимент, при котором на режиме существования низкочастотных колебаний скачков уплотнения была отключена физическая и турбулентная вязкость.

Тем самым рассчитывалось нестационарное взаимодействие венцов в потоке идеального газа. Сохранившиеся низкочастотные колебания скачков уплотнения подтвердили гипотезу, что природа этого явления не связана ни с какой формой вязкости, а определяется лишь упругими свойствами газа как сплошной среды.

Границы низкочастотных колебаний скачков уплотнения определяются комплексом параметров, в числе которых: геометрия профилей и тракта ступе-

ни; обороты рабочего колеса; число  $M$  на входе и выходе из ступени. В каждом конкретном случае эти границы могут быть определены из результатов численных исследований.

## 2. Косвенное подтверждение существования режима низкочастотных колебаний нестационарного течения газа в ступени турбомшины

Наиболее значимой работой в этом отношении является работа [2], в которой указывалось на нестационарный характер поведения скачков уплотнения в решетках.

Существуют также многочисленные исследования, подтвержденные экспериментальными данными нестационарного режима течения, возникающего вследствие автоколебаний скачков уплотнения на профиле крыла, обтекаемого стационарным потоком газа. Сошлемся лишь на серию работ, выполненных в Научно-исследовательском центре им. Эймса NASA [2 – 4]. Согласно этим работам, подтверждено численно и экспериментально существование в определенном диапазоне значений чисел  $M = 0,74 \div 0,78$  набегающего потока как стационарного, так и нестационарного режимов течений.

Описанный низкочастотный режим колебаний нестационарного потока газа в ступени компрессора, обусловленный автоколебаниями скачков уплотнения, должен сопровождаться высокочастотными акустическими колебаниями. Так что появление специфических шумов в работе турбомашин (шум «визга пилы», свист и т.д.), может также служить косвенным доказательством возникновения описанного режима.

Косвенным доказательством возникновения низкочастотного режима колебаний нестационарного потока газа в ступени турбомшины может служить также порой ничем необъяснимое возникновение низкочастотных колебаний роторов, вибрации корпусов турбомашин.

### Выводы

Результаты описанных исследований приводятся в настоящей работе в качестве предварительных, подтвержденных лишь косвенно экспериментом данных.

Прямое экспериментальное подтверждение существования режима низкочастотных колебаний нестационарного потока газа в ступени компрессора

важно не только для оценки работоспособности разработанного авторами метода численного моделирования, оно даст объяснение различным негативным явлениям, которые зачастую сопровождают работу современных турбомашин.

Уже сейчас, предварительный анализ результатов расчетов свидетельствует о том, что амплитуды нестационарных нагрузок, обусловленные низкочастотными колебаниями скачков уплотнения, могут в несколько раз превышать их средние значения. В то время как амплитуды высокочастотных колебаний, обусловленные следовой неравномерностью потока, составляют не более 5 – 10% от их средних значений.

### Литература

1. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Преимущества использования подвижных, лагранжевых сеток при численном моделировании течений сплошных сред // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 88 – 92.
2. Сигмиллер Х.Л., Марвин Дж.Г., Леви Л.Л. мл. Стационарное и нестационарное трансзвуковые течения // Ракетная техника и космонавтика. – 1978. – Т. 16, № 12. – С. 59 – 70.
3. Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
4. Марвин Дж.Г., Леви Л.Л. мл., Сигмиллер Х.Л. Экспериментальная проверка полуэмпирических моделей турбулентности в нестационарных околозвуковых потоках // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – Т. 18, № 6. – С. 13 – 23.

*Поступила в редакцию 11.05.2004*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Е.А. Егоров, Запорожский государственный технический университет, Запорожье.