

УДК 621.44.533.697

**В.М. ЛАПОТКО, Ю.П. КУХТИН***Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВОЗБУЖДАЮЩИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРОФИЛИ ЛОПАТОК И СТОЕК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ**

Результаты расчетов, представленных в данной работе, показывают, что спектр нестационарных сил, действующих на профили лопаток и стоек экспериментальной турбины, наряду с составляющими по основной частоте  $nZ$ , содержит зачастую низкочастотные составляющие, обусловленные нестационарностью и срывом потока. Эти низкочастотные составляющие могут стать причиной резонансных колебаний лопаточных аппаратов и вибраций узлов турбоустановки.

**нестационарное течение, абсолютная система координат, нестационарные силы, гармонический анализ, низкочастотные колебания**

**Введение**

Прогресс в развитии современных турбомашин характеризуется использованием высоконагруженных ступеней с высокими удельными параметрами, малыми размерами и весом. При создании таких турбомашин существенно обостряется проблема обеспечения их надежности и долговечности. Ведь элементы газодинамического тракта – рабочие и направляющие лопатки, профили стоек, имеющие свои собственные частотные характеристики, нагружены переменными во времени силами. Частотные характеристики и амплитуды этих нагрузок определяются результатом нелинейного взаимодействия составных элементов лопаточной машины. К тяжелым последствиям может привести явление резонанса, имеющее место при совпадении собственных частот колебаний с частотами приложенных нестационарных сил.

Чтобы избежать этого и подобных ему негативных явлений, необходимо еще на стадии проектирования узлов турбомашин проведение их систематических исследований в условиях, близких к реальным.

Большой интерес представляет возможность оценки влияния того или иного элемента узла на

частотный спектр возникающих нестационарных сил. Особую же значимость приобретает возможность прогнозирования низкочастотных колебаний, обусловленных срывными явлениями в турбомашинках.

В связи с этим является актуальным разработка численного метода, позволяющего рассчитать и подвергнуть спектральному анализу нестационарные газодинамические силы, действующие на профили лопаток и стоек турбомашин.

Предметом исследования, результаты которого представлены в данной работе, являлась экспериментальная выхлопная система турбовального двигателя, включающая в себя ступень силовой турбины, профили стоек и выхлопное сопло (рис. 1, 2).

Газодинамические параметры, определяющие режим работы исследуемого узла, были следующие:  $n = 38942$  об/мин;  $P^* = 234700$  Па;  $T^* = 1131$  К;  $P_a = 101357$  Па;  $T_a = 288$  К;  $\alpha = 17,0^\circ$ ;  $\kappa = 1,33$ ;  $R = 287,0$  Дж/кг·К. Число Рейнольдса, определенное по общей осевой протяженности расчетной области, изотермической скорости звука  $\sqrt{RT_a}$ , физической вязкости среды на выходе устройства составило 8260000,0.

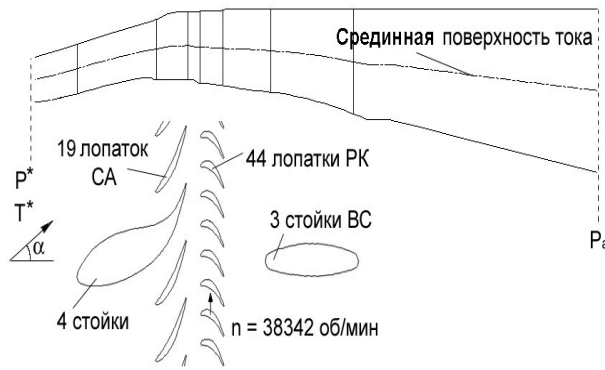


Рис. 1. Конфигурация тракта и фрагмент раз-  
вертки срединной поверхности тока

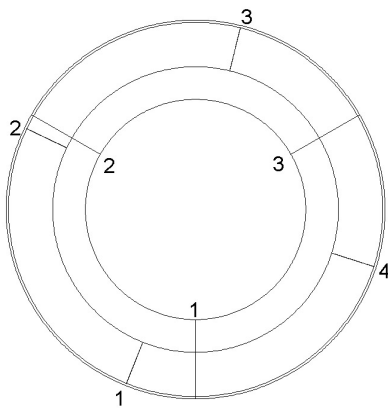


Рис. 2. Расположение выходных кромок профилей стоек соплового аппарата (СА) и профилей стоек выхлопной системы (ВС) – вид по полету

Как видно из рис. 1 и 2, особенностью рассматриваемой схемы узла турбины являлась сложная конструкция СА, включающего в себя 4 профиля широкохордных, толстопрофильных стоек. На входе в ВС турбомашины после рабочего колеса (РК) располагались 3 профиля стоек. Окружное расположение всех этих стоек не являлось симметричным (рис. 2).

## 1. Выбор метода исследования

При проектировании турбомашины приходится всесторонне анализировать различные варианты компоновочных схем на возможность возникновения негативных явлений, связанных с колебаниями и вибрациями отдельных элементов

тракта. Для эффективного решения этой проблемы необходимо создание комплексной вычислительной системы, моделирующей работу отдельных узлов турбомашины в условиях, близких к реальным.

Однако, современный уровень развития численных методов и вычислительной техники не позволяют все еще при решении поставленной задачи опираться на описание пространственного течения вязкого газа. Говоря о низком уровне развития численных методов, авторы имеют в виду отсутствие достаточно эффективных методов описания пространственного нестационарного течения вязкого газа в ступени без потери точности на стыках расчетных сеток.

Еще более усугубляется проблема выбора метода широтой исследуемого диапазона времени. Для решения поставленной задачи – исследования спектра нестационарных сил течение газа должно быть рассчитано в трех полных венцах. А учитывая возможность возникновения низкочастотных колебаний газа, обусловленных срывными режимами течения, требуется проводить аэродинамический расчет системы трех полных венцов в течение нескольких оборотов ротора.

Руководствуясь изложенными соображениями, авторы ограничились исследованием 2-d нестационарного течения вязкого газа в слое переменной толщины на переменном радиусе. В качестве инструмента исследования использовался метод отслеживания струй тока (МОСТ), позволяющий проводить многовариантные расчеты таких течений с приемлемыми издержками по времени [1].

В основу предложенного метода положено численное решение с помощью консервативной разностной схемы общих нестационарных уравнений, записанных в виде законов сохранения для вязкого теплопроводного газа [2].

Процессы теплообмена, обусловленные молекулярным и турбулентным движениями среды,

имитировались источниками и стоками массы, импульса и энергии. Определение интенсивностей этих источников и стоков предполагает использование достижений кинетической теории газов и современных моделей турбулентности [3].

Отличительной чертой разностной схемы являлось использование подвижных, так называемых лагранжевых сеток. Лагранжевые сетки – это ориентированные в направлении течения бесконечно тонкие, невесомые и непроницаемые для основного потока поверхности. Такие поверхности являются проницаемыми лишь для молей среды, которые имитируют диффузию, обусловленную физической вязкостью и турбулентным движением среды.

Разработанный универсальный алгоритм обеспечивает как совпадение лагранжевых поверхностей с поверхностями раздела струй тока, так и выполнимость для каждого элемента расчетной области законов сохранения, записанных в переменных Эйлера. По сути такой подход сочетает в себе черты как лагранжева, так и эйлера представлений. Поэтому эффективность данного метода приближается к эффективности эйлеровых алгоритмов.

Хорошо адаптированный для расчета нестационарных течений газа в решетках турбомашин этот метод позволяет проводить интегрирование исходной системы уравнений в единой (как в абсолютной, так и в относительной) системе координат для всех взаимодействующих решеток. Такой подход позволил устранить негативный эффект – «мазание» параметров на линиях стыковки сеток. Что особенно важно при исследовании нестационарных течений в турбомашине, где наряду с потенциальной неравномерностью поля параметров, присутствует не менее интенсивная следовая неравномерность параметров.

## 2. Обсуждение результатов расчетов

В результате проведенных расчетов получены нестационарные поля параметров, характеризующих

течение газа в трех взаимодействующих венцах. Фрагменты мгновенных полей, турбулентной вязкости, связанного с потерями параметра энтропии, представлены на рис. 3 и 4.

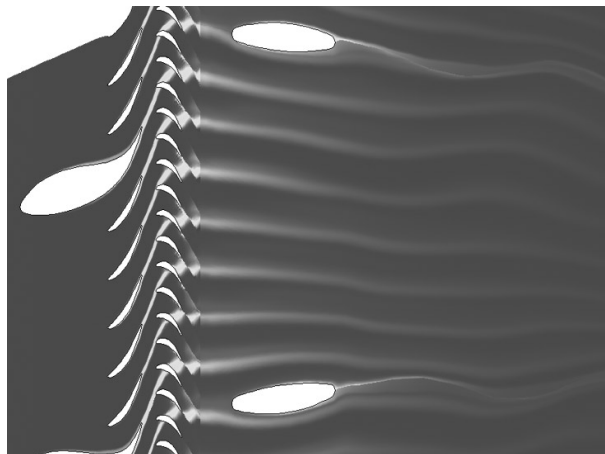


Рис. 3. Фрагмент поля турбулентной вязкости в фиксированный момент времени

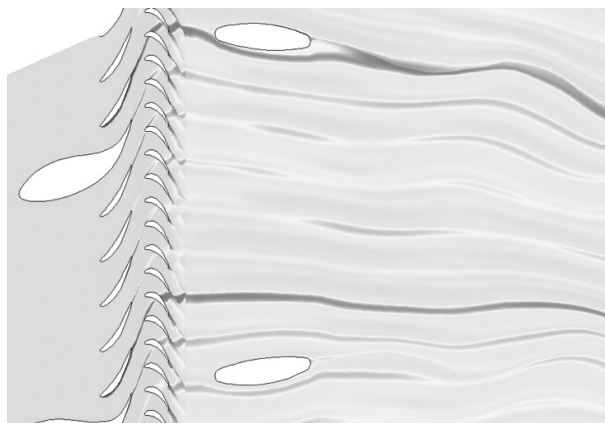


Рис. 4. Фрагмент поля параметра энтропии в фиксированный момент времени

Из анализа картины течения, представленной на рисунках, видно, что ближайшая к стойке со стороны корыта лопатка СА имеет толстый пограничный слой по всей длине спинки. Потери полного давления, отнесенные к перепаду давления в этом венце, составили 5%. Отсюда следует целесообразность перепрофилирования зон сопряжения стоек и лопаток СА.

Нестационарную картину течения вязкого газа в данном узле экспериментальной турбоустановки можно представить, если посмотреть анимационный

фильм развития во времени поля параметра энтропия, составленный по результатам расчетов. С указанным фильмом можно познакомиться на сайте: [http://flow\\_gd.tripod.com](http://flow_gd.tripod.com).

Однако основной целью проводимых исследований являлся спектральный анализ нестационарных сил, приложенных к отдельным элементам турбоустановки.

Амплитуды нестационарных сил, действующих на лопатки и стойки СА, составили  $\approx 5 \div 8\%$  от их осредненных значений, что свидетельствует об отсутствии заметного влияния вверх по потоку лопаток РК.

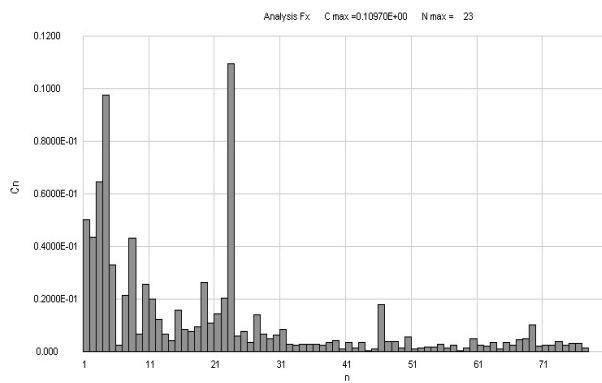


Рис. 5. Спектральная характеристика возбуждающих сил, действующих на лопатки РК (осевая составляющая)

Амплитуды нестационарных сил, приложенных к лопаткам РК, составили  $\approx 28 \div 30\%$  от их осредненных значений. Спектр гармоник этих нестационарных сил (рис. 5, 6) характеризуется как присутствием высокочастотных гармоник, вызванных расположенными выше по потоку лопатками СА, так и гармоник, обусловленных интегрированными в СА профилями стоек. Результаты анализа спектрограмм нестационарных сил, действующих на рабочие лопатки, показали, что наряду с составляющими на основной следовой частоте  $nZ$ , присутствуют также низкочастотные составляющие, происхождение которых можно объяснить нестационарностью и срывными режимами обтекания лопаток.

Амплитуды нестационарных сил, действующих на стойки ВС, составили  $\approx 150 \div 200\%$  их средних значений. Спектры гармоник этих нестационарных сил представлены на рис. 7 и 8.

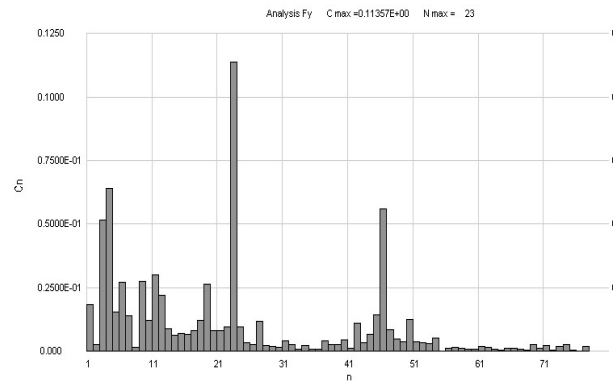


Рис. 6. Спектральная характеристика возбуждающих сил, действующих на лопатки РК (окружная составляющая)

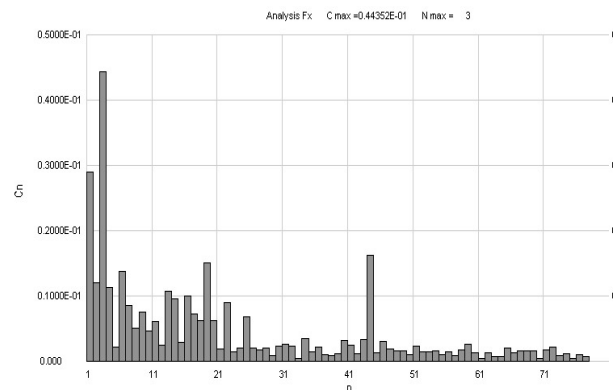


Рис. 7. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на стойки ВС (осевая составляющая)

Наряду с высокочастотными источниками возмущений, которыми являются вышестоящие по потоку лопатки РК, в спектре гармоник присутствует также низкочастотный источник возмущения, природа которого кроется в периодическом срыве вихрей (дорожка Кармана) в кормовой части стоек.

Таким образом, результаты расчетов, представленных в данной работе, показывают, что спектр нестационарных сил наряду с составляющими на основной частоте  $nZ$  содержат зачастую низкочас-

тотные составляющие, обусловленные срывом потока (рис. 9).

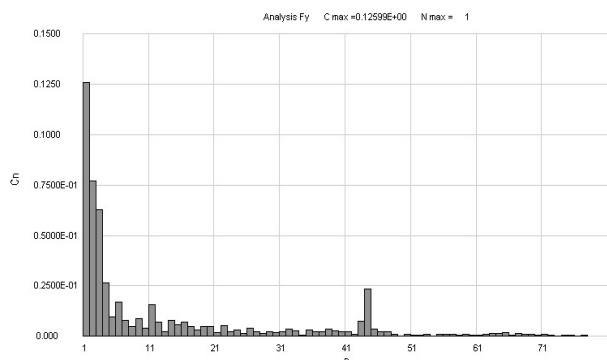


Рис. 8. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на стойки ВС (окружная составляющая)

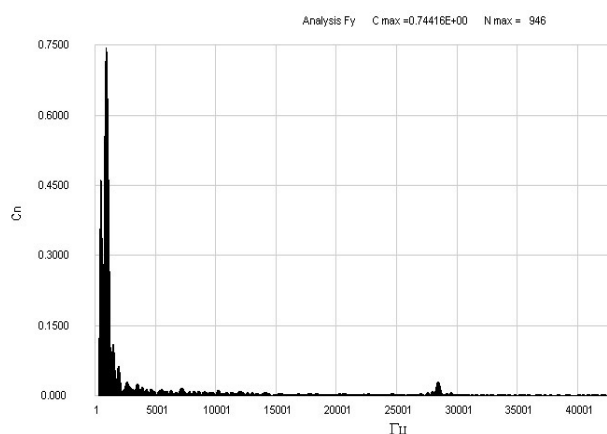


Рис. 9. Спектральная характеристика нестационарных сил, действующих на стойки ВС (низкочастотные составляющие)

Эти низкочастотные составляющие могут стать причиной резонансных колебаний и вибраций узлов турбоустановки.

### Заключение

Обратим внимание на то, что в приведенном выше расчете не потребовалось вводить каких-либо ограничений, связанных с кратностью лопаток. Венцы рассчитывались с реально существующим трактом и максимально приближенной к реальности геометрией лопаток.

Для  $\approx 100000$  элементов расчетной сетки, покрывающей область исследования, состоящую из трех полных венцов, расчет на ПК Pentium IV 1,8 ГГц длился  $\approx 30$  часов. При этом после достижения периодической повторяемости течения был пройден интервал времени, эквивалентный времени совершения 10 оборотов ротора рабочего колеса.

Полученные расчетным путем спектрограммы возбуждающих сил могут быть использованы совместно со спектрограммами собственных частот колебаний элементов турбоустановки для исключения неблагоприятных режимов работы.

Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований, по-видимому, будут являться аналогичные работы по гармоническому анализу нестационарных сил, действующих на колеблющиеся профили лопаток и стоек. Разработанный метод позволяет проводить исследования таких сопряженных задач.

### 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.: ХАИ, 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 88 – 92.
2. Мунштуков Д.А. Дивергентные формы уравнений, описывающих движение среды в турбомашинах (учебное пособие). – Х.: ХАИ, 1995. – 73 с.
3. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Модель и метод расчета турбулентных течений вязкого теплопроводного газа // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – Вып. 41/6. – С. 65 – 68.

*Поступила в редакцию 01.06.2004*

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