

УДК 621.44.533.697

В.М. ЛАПОТКО¹, Ю.П. КУХТИН¹, Г.И. СЛЫНЬКО²¹ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина²Запорожский Национальный технический университет, Запорожье, Украина

МЕТОД ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ТОНАЛЬНОГО ШУМА В ИСТОЧНИКЕ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЕНЦОВ ТУРБОМАШИН

Выполнен анализ происхождения тонального шума с использованием метода отслеживания струй течений газа на примере 1.5 экспериментальной ступени турбины низкого давления. Используемый метод доработан для учета трехмерных эффектов течений в турбомашинных. Расчеты проводились в абсолютной системе координат связанной со статором турбомашин. Показаны различные причины возникновения тонального шума когда источником аэродинамической неравномерности являлись сопловой аппарат (СА) или рабочее колесо (РК). Численными исследованиями показано, что для уменьшения тонального шума турбины необходимо обеспечить равномерное поле скоростей, как по величине скорости (после СА), так и по направлению скорости (после РК).

Ключевые слова: тональный шум, пульсационное давление, Эйлерово-Лагранжев метод, нестационарное взаимодействие венцов.

Введение

В свое время представленный в работе [1] метод оценки акустического взаимодействия венцов турбины вентилятора был разработан в предположении $q3d$ -течения. В предлагаемой работе указанный метод доработан с целью учета трехмерных эффектов течения газа в турбомашинных. В отличие от предыдущей работы по высоте тракта теперь может быть расположено k -слоев, границы которых устанавливаются из предварительного решения задачи течения идеального газа. При проведении основного расчета их положение в пространстве остается неизменным (рис. 1).

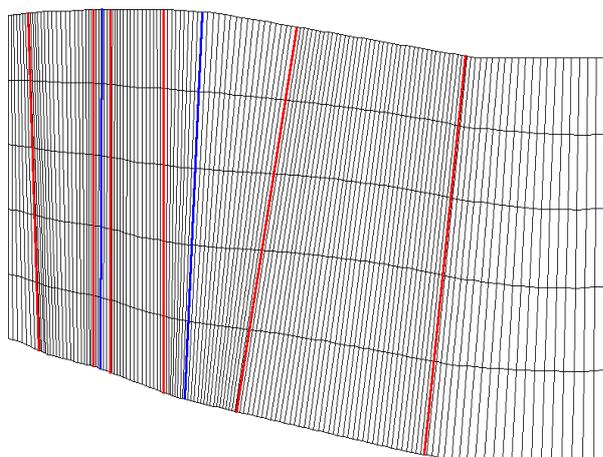


Рис. 1. Схема меридионального тракта турбины с сеточными линиями

Таким образом доработанный метод отслеживания струй течений (МОСТ) газа [2] основан на Эйлерово-Лагранжевом представлении течения газа. В каждый момент времени боковые грани расчетных элементов, ориентированные в направлении основного течения, являются поверхностями контактного разрыва параметров. Это обеспечивает высокую точность расчета при наличии в поле течения произвольно движущихся пространственных неравномерностей скорости, температуры, плотности среды.

Процессы теплообмена, обусловленные молекулярным и турбулентным движениями среды воспроизводились потоками субстанции [3]. Определение интенсивности этих потоков предполагает использование достижений кинетической теории газов и основных достижений современных моделей турбулентности.

Используя Эйлерово-Лагранжев подход, мы реализовали схему расчета течения газа в 1.5 ступени турбомашин в единой абсолютной системе координат. Тем самым был устранен негативный эффект – «мазание» параметров потока на стыках сектор, что свойственно методам, использующим скользящие сетки.

1. Обозначения

Tu , α – соответственно, степень турбулентности и угол входа потока.

P_0^0, T_0^0 – соответственно, полное давление и полная температура в сечении входа.

P_a, T_a – соответственно, давление и температура в сечении выхода.

S, ω – соответственно, энтропия среды и частота вращения ротора.

W – скорость течения газа.

РК, СА – соответственно, рабочее колесо и сопловой или спрямляющий аппарат.

2. Объект исследований

Объектом численных исследований являлась экспериментальная ступень турбины и расположенный ниже по течению венец аэродинамических стоек, который можно условно рассматривать как сопловой аппарат. Тем самым мы рассматриваем последние 1.5 ступени турбины низкого давления, которые при определенных условиях могут стать мощным источником тонального шума (рис. 2).

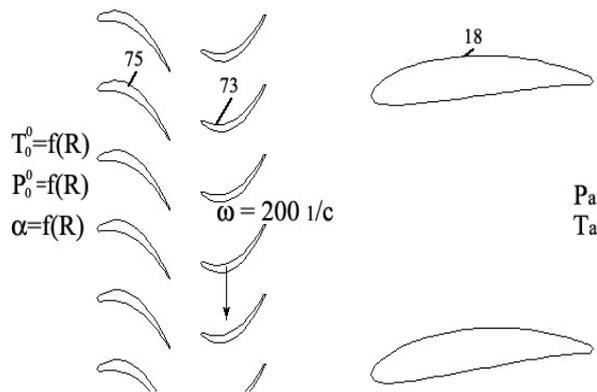


Рис. 2. Исследуемые 1.5 ступени экспериментальной турбины низкого давления

Режим работы турбины соответствовал 0.3 от номинального режима работы двигателя. Все величины приводились к безразмерному виду. Эталоном длины была принята общая протяженность расчетной области, которая составляла 531.4 мм. В качестве эталонов давления и температуры принимались, соответственно, значения $P_a = 107840.0$ Па, $T_a = 683.3$ К на выходе турбины. Показатель адиабаты $k = 1.33$, газовая постоянная $R = 287.0$ Дж/(кг К). Эталоном скорости служила изотермическая скорость звука $\sqrt{RT_a}$. Число Рейнольдса, определенное по общей осевой протяженности расчетной области и физической вязкости газа на выходе из турбины, составило 3970000.0. Фоновая турбулентность течения на входе в расчетную область $T_{U0} = 2\%$.

3. Предмет исследований

Причиной возникновения тонального шума нестационарного взаимодействия РК и СА являются периодические пульсации давления на поверхностях лопаток, вызванные попаданием на них аэродинамических неоднородностей потока, создаваемых расположенными выше по потоку лопатками. Так, в рассмотренной конструкции причиной возникновения тонального шума 75 гармоники являются периодические пульсации давления на поверхностях лопаток РК, вызванные попаданием на них аэродинамических следов, сошедших с лопаток СА.

Причиной же возникновения тонального шума 73 гармоники являются периодические пульсации давления на поверхностях лопаток второго соплового аппарата, расположенного ниже по потоку от РК.

Предметом исследований представленных в работе являлись поля нестационарного давления, образующиеся на указанных поверхностях.

Для получения таких полей в программе расчета была заложена процедура накопления по времени значений параметра P в конкретных точках поверхности исследуемой лопатки в течение 1.5-2.0 оборотов ротора. Расчет 1.5 полной ступени турбины проводился в течение 2.0-3.0 оборотов ротора в абсолютной системе координат, связанной со статором турбомашин.

Полученные поля нестационарного давления на поверхностях рабочих лопаток и лопаток соплового аппарата подвергались Фурье анализу. Из этого анализа можно получить ряд выводов о направлении дальнейших исследований, связанных с уменьшением тонального шума турбины.

4. Результаты расчетов

В результате расчетов получены нестационарные поля параметров, характеризующих течение газа в турбине (рис. 3).

4.1. Нестационарное взаимодействие СА-РК

Результаты расчетов показывают, что после лопаток первого соплового аппарата образуются аэродинамические следы, которые характеризуются дефектом скорости. При этом практически отсутствует неравномерность по параметру P – давление и α – угол ориентации вектора скорости (рис. 4).

В результате взаимодействия этих следов с РК на поверхности рабочих лопаток в области входных кромок наблюдается интенсивная пульсация давления с частотой, связанной с количеством лопаток СА (рис. 5).

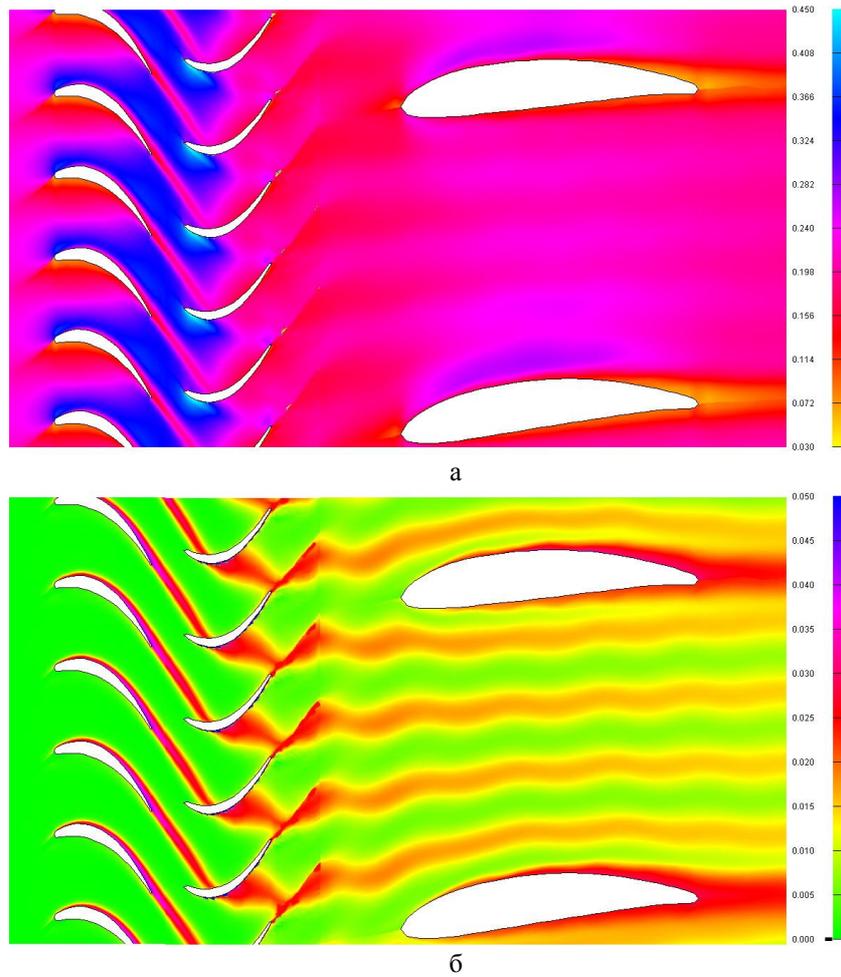


Рис. 3. Фрагменты мгновенного поля параметров а – числа М, б – энтропии

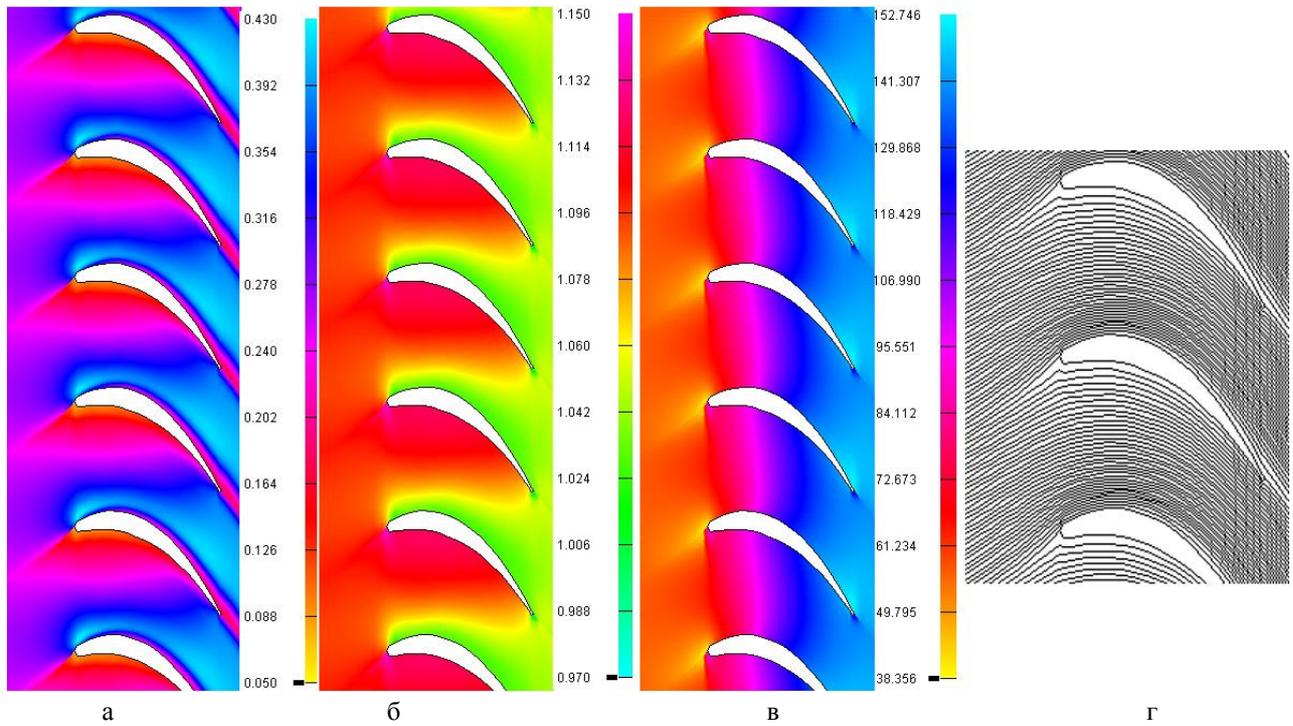


Рис. 4. Фрагменты мгновенного поля: а – скорости, б – давления, в – угла скорости, г – сеточных поверхностей при обтекании соплового аппарата

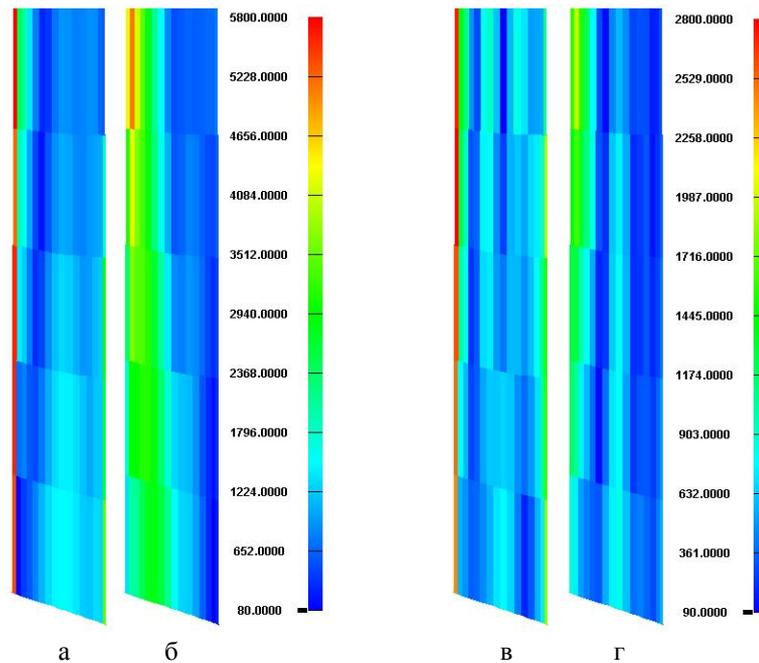


Рис. 5. Уровень пульсационного давления на поверхности рабочей лопатки по 75-ой гармонике: а – корыто; б – спинка, по 150-ой гармонике: в – корыто; г – спинка

4.2. Нестационарное взаимодействие РК-СА

Результаты расчетов показывают (рис. 6), что после рабочего колеса образуются аэродинамические следы, которые характеризуются слабым дефектом скорости и сильным изменением (10-15°) угла вектора скорости. В результате взаимодействия этих следов со вторым сопловым аппаратом на входных кромках лопаток соплового аппарата наблюдается интенсивная пульсация давления с частотой следования рабочих лопаток – 73 (рис. 7).

той следования рабочих лопаток – 73 (рис. 7).

Помимо пульсационного давления на входных кромках лопаток второго соплового аппарата, обусловленного сильным изменением угла вектора скорости, наблюдается пульсация давления в задней части спинки профиля лопаток соплового аппарата (в области, расположенной от корня на 30% по высоте лопатки). Причина высокого уровня колебаний давления в этой области – отрыв потока (рис.8).

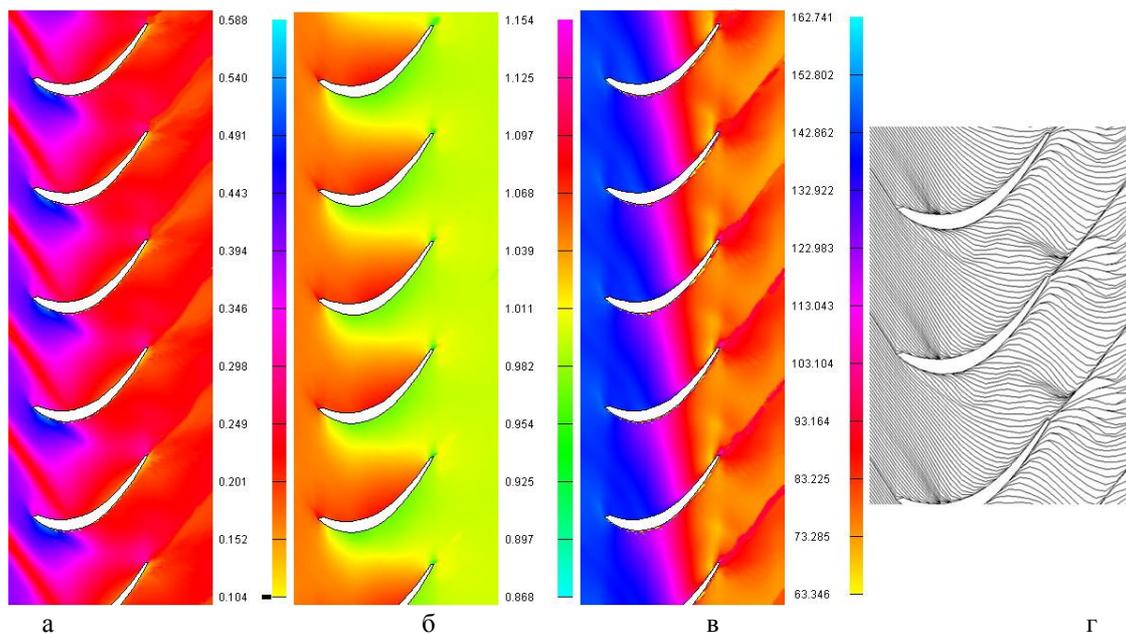


Рис. 6. Фрагменты мгновенного поля: а – скорости; б – давления; в – направления вектора скорости; г – сеточные поверхности при обтекании лопаток рабочего колеса

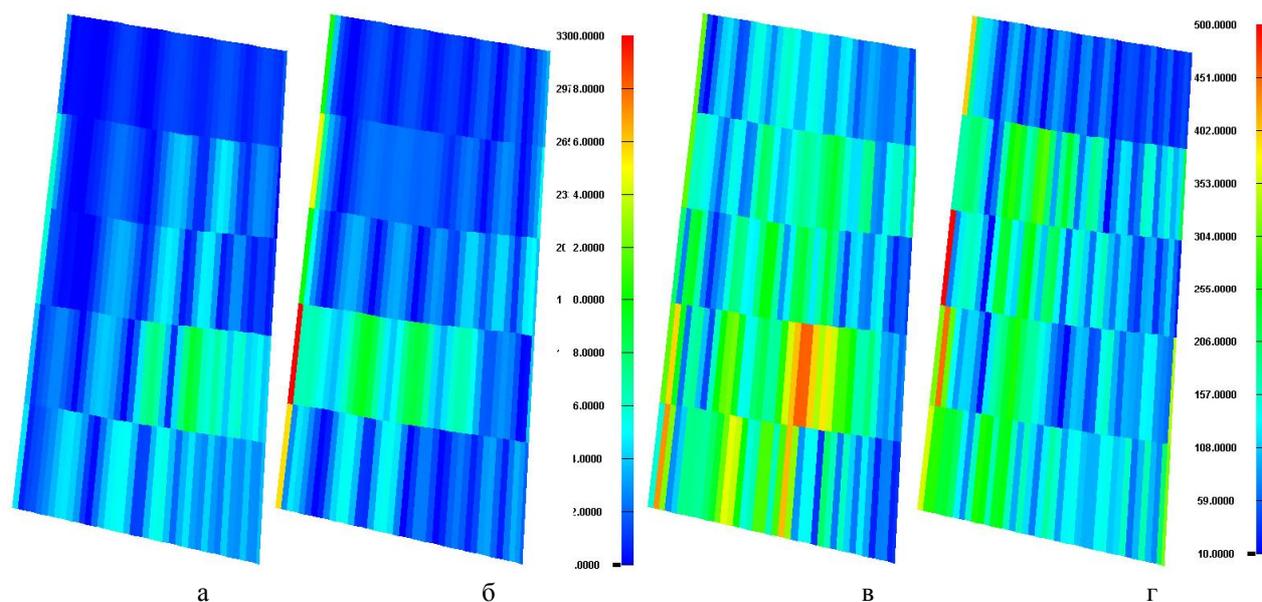


Рис. 7. Уровень пульсационного давления на поверхностях лопаток второго соплового аппарата по 73-ей гармонике: а – на спинке; б – на корыте, по 146-ой гармонике: в – на спинке; г – на корыте

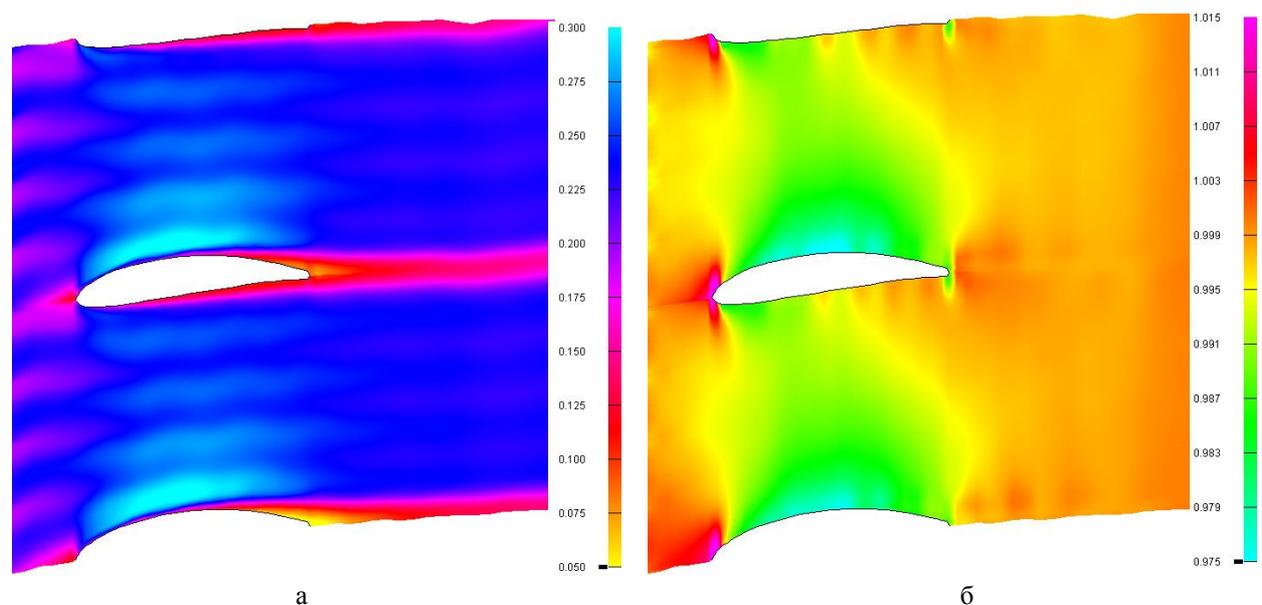


Рис. 8. Структура течения в области отрыва потока на спинке лопаток второго соплового аппарата: а – скорость; б – давление

Выводы

Для уменьшения тонального шума турбины по 75-ой и 73-ей гармониках необходимо:

1. Устранить отрывное обтекание лопаток второго соплового аппарата.
2. Снизить величину дефекта скорости в аэродинамических следах лопаток после первого соплового аппарата.
3. Снизить величину градиента неравномерности угла вектора скорости после лопатки рабочего колеса.

Литература

1. Оценка акустического взаимодействия венцов турбины вентилятора двигателя Д-18Т [Текст] / Ф.М. Муравченко., В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, С.Б. Резник, А.И. Попуга // Вестник двигателестроения. – Запорожье: Мотор-Сич, 2006. – № 1. – С. 8-13.
2. Лапотко, В.М. Эйлерово-Лагранжев подход при численном моделировании нестационарных течений идеального газа [Текст] / В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 7 (43). – С. 12-17.

3. Лапотко, Ю.П. Модель и метод расчета турбулентных течений вязкого теплопроводного газа [Текст] / В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 41/6. – С. 65-68.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Качан, зав. кафедрой технологии авиационных двигателей Запорожского Национального технического университета, Запорожье, Украина.

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОЇ ОЦІНКИ РІВНЯ ТОНАЛЬНОГО ШУМУ У ДЖЕРЕЛІ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНІЙ ВЗАЄМОДІЇ ВІНЦІВ ТУРБОМАШИН

В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин, Г.І. Сльнко

Виконано аналіз походження тонального шуму з використанням методу відстеження струменів плинів газу на прикладі 1.5 експериментального щабля турбіни низького тиску. Використовуваний метод дороблений для обліку тривимірних ефектів плинів у турбомашині. Розрахунки проводилися в абсолютній системі координат, зв'язаній зі статором турбомашини. Показано різні причини виникнення тонального шуму, коли джерелом аеродинамічної нерівномірності були сопловий апарат (СА) або робоче колесо (РК). Чисельними дослідженнями було показано, що для зменшення тонального шуму турбіни необхідно забезпечити рівномірне поле швидкостей, як з величиною швидкості (після СА), так і з напрямом швидкості (після РК).

Ключові слова: тональний шум, пульсаційний тиск, Ейлера-Лагранжев метод, нестационарна взаємодія вінців.

METHOD OF NUMERICAL ASSESSMENT OF TONAL NOISE IN SOURCE AT UNSTATIONARY INTERACTION OF TURBOMACHINERY RIMS

V.M. Lapotko, Yu.P. Kukhtin, G.I. Slynko

The analysis of tonal noise origin has been performed by using the method of tracking of streams of gas flows as based on the example of 1.5 experimental LPT stage. The method used has been developed for accounting the 3-D effects of flows in a turbomachinery. The calculations have been made in an absolute coordinate system connected with a turbomachinery stator. Different causes of tonal noise origin have been described for cases when a nozzle guide vane (NGV) or rotor wheel were considered as a source of aerodynamical irregularity. It was shown by computational investigations that for diminishing the turbine tonal noise provision of uniform velocity field, both in velocity magnitude (after NGV) and in velocity direction (after working wheel), is required.

Key words: tonal noise, pulsed pressure, ALE, unsteady rotor-stator interaction.

Лапотко Василий Михайлович – кандидат технических наук, ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: flow_gd@mail.ru.

Кухтин Юрий Петрович – кандидат технических наук, инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: flow_gd2@mail.ru.

Сльнко Георгий Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедрой теплотехники и гидравлики Запорожского Национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: gslynko@zntu.edu.ua.