

УДК 532.529

ТЕЧЕНИЕ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В РЕШЕТКАХ ПРОФИЛЕЙ

© 2011 г.

Ю.М. Циркунов, Д.А. Романюк

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург

tsrknv@bstu.spb.su

Поступила в редакцию 16.06.2011

Численно исследовано нестационарное течение запыленного газа через систему из двух плоских решеток аэродинамических профилей (лопаток), первая из которых движется (ротор), а вторая неподвижна (статор). Получены картины течения моно- и полидисперсной примеси. Изучено влияние перемешивания в потоке частиц различных фракций и рассеяния частиц при отскоке от лопаток на перераспределение примеси.

Ключевые слова: нестационарное течение, решетки профилей, запыленный газ, численное моделирование.

Течение через решетки профилей вызывает интерес в связи с моделированием потоков в осевых турбомашинах. На практике рабочий газ, текущий по тракту машины, часто содержит взвешенные твердые частицы или капли жидкости. Наличие дисперсной фазы в потоке приводит, как правило, к нежелательным эффектам, в частности, к абразивной эрозии лопаток при множественных столкновениях с ними частиц или капель, к дополнительным потерям импульса и энергии [1]. Наиболее уязвимой для эрозии является входная ступень турбомшины. Для прогнозирования положения зон, подверженных наиболее сильному эрозионному воздействию, необходимо иметь ясное представление о характерных особенностях поведения и перераспределения частиц в потоке. Реальное течение в тракте турбомшины является, строго говоря, пространственным. Пространственные эффекты особенно важны вблизи внутренней и внешней стенок канала. Однако многие важные особенности течения во входной ступени и последующих венцах могут быть изучены в двухмерной постановке на плоскости, представляющей собой развертку среднего кольцевого сечения венца турбомшины. Такой подход оказался очень плодотворным и привел к появлению теории плоских решеток (см., например, [2]). Стационарное и квазистационарное течения газозвеси через неподвижный и вращающийся венцы рассматривались в [3, 4]. Цель настоящего исследования – изучение и анализ свойств нестационарного дозвукового двухфазного течения газа с твердыми частицами в системе двух решеток «ротор–статор».

Концентрация примеси считается очень малой, так что можно пренебречь столкновениями между частицами и их обратным влиянием на течение несущего газа. Последовательно решаются две задачи: 1) расчет нестационарного поля течения газовой фазы, 2) расчет движения частиц в этом поле.

Течение сжимаемого газа описывается полными уравнениями Навье–Стокса или уравнениями Рейнольдса с использованием SST модели Ментера для турбулентности. И те, и другие в настоящем исследовании решались численно явным конечно-объемным методом второго порядка. Расчетная область состояла из двух блоков – подвижного и неподвижного. В каждом блоке находилась только одна лопатка и вводилась структурированная криволинейная сетка, согласованная с контуром лопатки. Для расчета «невязких» потоков консервативных переменных через грани расчетных ячеек использовалась схема Роу. «Вязкие» потоки вычислялись на основе реконструкции параметров газа на сетке с учетом их градиентов в каждой ячейке. Для согласования параметров между подвижным и неподвижным блоками расчетной сетки использовалась специально разработанная процедура переинтерполяции [5]. На верхних и нижних границах каждого блока ставились условия периодичности, что возможно при отсутствии больших отрывных областей за лопатками. На входной границе движущегося блока скорость и плотность вычислялись по заданным значениям полной энтальпии и энтропии в невозмущенном потоке, а давление экстраполировалось из расчетной области. На выходной границе неподвижного блока задавалось давление, равное $1.2p_\infty$ (это зна-

чение взято из экспериментальных данных), а остальные параметры экстраполировались из расчетной области. Такая «техника» согласуется с характеристическими свойствами уравнений газовой динамики. На поверхностях лопаток ставились условия прилипания и изотермичности. Роль схемной вязкости в формировании вихревых следов за профилями оценивалась путем сравнения результатов, полученных на основе уравнений Навье–Стокса или Рейнольдса, с полями параметров, рассчитанных на основе уравнений Эйлера. Найдено, что решение на основе уравнений Эйлера дает практически однородное поле энтропийной функции во всей области течения, что свидетельствует о низкой схемной вязкости. Течение вязкого газа в системе решеток сопровождалось возникновением за лопатками следов с выраженной крупномасштабной периодической вихревой структурой, подобной вихревой дорожке Кармана. Течение в системе решеток в целом не является периодическим даже при одинаковом шаге решеток. Вихревые следы за профилями генерируют довольно интенсивные акустические волны.

В модели взаимодействия дисперсной фазы с несущим газом частицы примеси считаются сферическими, учитываются сила их аэродинамического сопротивления, поперечная сила Магнуса и демпфирующий момент. Последние два фактора играют важную роль, когда частицы закручиваются при ударе о лопатки. В модели ударного взаимодействия частиц с лопатками рассматривались как сферические, так и слабонесферические частицы (эллипсоиды вращения с эксцентриситетом, близким к единице). В последнем случае использовалась трехмерная модель удара со случайной ориентацией частицы перед столкновением с поверхностью [6]. Поведение примеси в решетках исследовалось путем численного решения уравнений движения большого количества частиц (от 10^4 до 10^6). Параметры решеток и набегающего потока выбраны близкими к таковым во входной ступени осевого компрессора авиационного турбореактивного двигателя. Течение несущего газа визуализировалось с помощью анимации полей числа Маха и энтропийной функции. Течение примеси визуализировалось с помощью анимации картин распределения частиц в решетках. В невозмущенной области рассматривалось облако частиц, имеющее конечную толщину в направлении потока. Типичные картины распределения частиц в решетках показаны на рис. 1 (скорость невозмущенного потока $V_\infty = 200$ м/с; скорость роторной решетки $V_r = 150$ м/с). На рис. 1а представлены мгновенные картины сферических монодисперсных частиц в потоке, а на рис. 1б – эллипсо-

идальных полидисперсных частиц в потоке; диаметр сферических частиц и наиболее вероятный

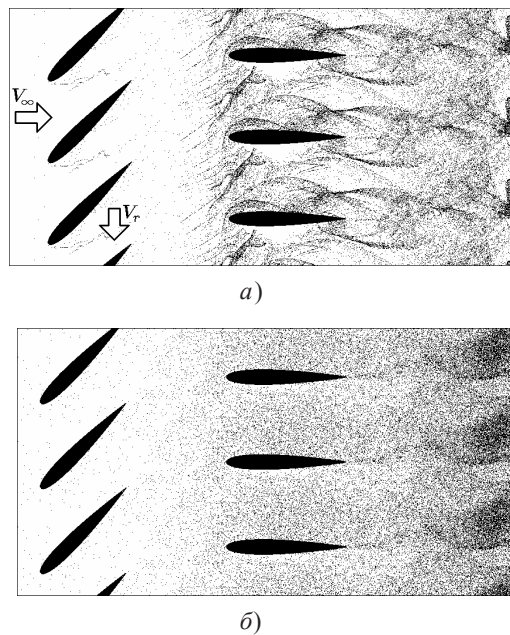


Рис. 1

размер полидисперсных частиц 40 мкм.

Выполненное исследование показало, что дисперсные частицы интенсивно перераспределяются в потоке. Поведение дисперсной фазы существенно зависит от размера частиц. Движение мелких частиц в основном определяется течением несущего газа, которое значительно усложняется вследствие срыва вихрей с лопаток с формированием вихревых следов. Крупные частицы, сталкиваясь с лопатками, отскакивают от них, причем отраженные частицы могут затем столкнуться как с ближними, так и с дальними лопатками, что делает структуру течения примеси более сложной. В случае монодисперсных сферических частиц возникают узкие области с высокой концентрацией частиц. Перемешивание частиц разного размера и их рассеяние вследствие несферической формы приводят к размыванию этих слоев. Это означает, что в реальных течениях запыленного газа эрозийная опасность от ударов частиц меньше, чем прогнозируемая теорией двухфазных течений, полагающей частицы сферическими с одинаковым радиусом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-00888).

Список литературы

1. Tabakoff W., Hamed A. // Proc. JSME and ASME 1977 Joint Gas Turbine Congress. Tokyo, Japan. 1977. P. 574–581.

2. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962.
3. Hussein M.F., Tabakoff W. // Dept. of Aero. Engng. TR 72-27, University of Cincinnati. 1972. AD-764267.
4. Hussein M.F., Tabakoff W. // J. Aircraft. 1973. Vol. 10, No 7. P. 434-440.
5. Romanyuk D.A., Tsirkunov Yu.M. // Proc. V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010, Lisbon, Portugal, 14-17 June, 2010. Paper No 01063.
6. Панфилов С.В., Циркунов Ю.М. // ПМТФ. 2008. Т. 49, №2. С. 79-88.

DUSTY GAS FLOW THROUGH CASCADES OF AIRFOILS

Yu.M. Tsirkunov, D.A. Romanyuk

Unsteady dusty gas flow through a set of two cascades is investigated numerically. The first cascade moves across the flow (rotor) and the second one is immovable (stator). Flow patterns of both phases, the carrier gas and the dispersed phase, are obtained for monosized and polydisperse particles. The effects of mixing of particles of different sizes and scattering of particles in particle-blade collisions are studied.

Keywords: unsteady flow, cascades of airfoils, dusty gas, computational simulation.