

УДК 621.165

Ю. А. БЫКОВ, канд. техн. наук, вед. инж., Институт проблем машиностроения им А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков
В. И. ГНЕСИН, докт. техн. наук, проф., зав. отделом, Институт проблем машиностроения им А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НА АЭРОТЕРМОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ТУРБИННОЙ ЛОПАТКИ

Представлены результаты численного моделирования связанных аэротермоупругих колебаний лопатки газовой турбины для условий холодной и нагретой лопатки с охлаждающими каналами. Приведены результаты анализа условий возникновения автоколебаний лопатки.
Ключевые слова: численные методы в теории аэроупругости, динамика лопаток турбомашин, аэротермоупругость.

Представлено результати чисельного моделювання сумісних аеротермопружних коливань лопатки газової турбіни для умов холодної та нагрітої лопатки з охолоджувальними каналами. Наведено результати аналізу умов виникнення автоколивань лопатки.
Ключові слова: чисельні методи в теорії аеропружності, динаміка лопаток турбомашин, аеротермопружність.

The results of numerical simulation of coupled aerothermoelastic vibrations of gas turbine blade for conditions of cool and heated blade with cooling are presented. The conditions of self-excited vibration onset of the blade are analyzed.
Key words: numerical methods in aeroelasticity theory, turbomachine blade dynamics, aerothermoelasticity.

1. Введение

Усиление конкуренции среди производителей и повышение требований к энергосбережению приводит к обострению проблемы повышения КПД турбомашин. Основным способом повышения эффективности турбомшины является увеличение температуры на входе в первые ступени турбины. Сегодня входные температуры рабочего колеса газовой турбины достигли уровня, который значительно превосходит температуры плавления материала лопаток турбины.

Для снижения температуры лопатки применяются различные технологии охлаждения. Значительная разница в температурах воздуха из камеры сгорания и охлаждающего воздуха из компрессора приводит к большим температурным напряжениям в теле лопатки. Это обстоятельство не учитывается в большинстве существующих методик оценки надежности работы лопаточных аппаратов, в частности, методик определения условий возбуждения автоколебаний лопаток в различных режимах работы турбины. Таким образом, актуальной является проблема оценки надежности лопаточных аппаратов с учетом повышенных тепловых нагрузок на лопатки, имеющих сложную структуру в связи с наличием

каналов охлаждения. Данная проблема чересчур сложна для экспериментальных исследований, поэтому с помощью внедрения в практику проектирования современных методов численного моделирования и вычислительных средств возможно существенно снизить затраты на экспериментальный поиск оптимальных материалов и режимов эффективной работы турбины.

Следовательно, актуальной проблемой на данный момент является проблема численного моделирования взаимодействия натекающего потока и колебаний лопаток с учетом значительной температурной неравномерности и сложной конструкции лопатки в первых ступенях газовых и паровых турбин.

Одной из задач, необходимых для решения данной проблемы, является связанное моделирование термоупругих колебаний лопатки турбомашин с учетом влияния неоднородного распределения температуры в лопатке и обтекания лопатки вязким газом с учетом влияния движения лопатки и теплообмена газа с поверхностью лопатки. Важность этой проблемы подтверждена исследованиями других авторов [1]. Совместная задача обтекания лопаточного венца и колебаний лопаток с использованием модального метода рассмотрена в работе [2]. Однако модальный метод недостаточно эффективен для решения задачи термоупругости лопаток. В статье рассмотрены результаты численного решения динамических уравнений аэротермоупругости лопатки с использованием метода моделирования упругих колебаний с учетом температурной неоднородности во всем объеме лопатки. Моделирование выполнено для лопатки с охлаждающими каналами, находящейся в состоянии постоянной низкой температуры, и в состоянии неравномерного распределения температуры, полученного в результате теплообмена с обтекающим потоком и потоком охлаждающей жидкости.

2. Математическая модель

Задача аэротермоупругости состоит из двух связанных задач: аэродинамической и термоупругой. Для решения аэродинамической задачи предлагается использовать ранее разработанный метод, основанный на популярном методе Годунова, имеющий второй порядок аппроксимации [3]. Для решения термоупругой задачи используется развитие ранее разработанного метода, основанного на методе конечных элементов [4].

Ставится задача по совместному решению динамических уравнений упругих колебаний лопатки турбомашин в трех пространственных измерениях с учетом температурной неоднородности, и аэродинамических уравнений обтекания лопатки вязким теплопроводным газом. Материал лопатки предполагается изотропным, с переменным модулем Юнга E , зависящим от температуры. Для замыкания уравнений Рейнольдса течения вязкого газа используется модель турбулентности $k-\omega$ [5].

На поверхности лопатки ставятся условия сопряжения уравнений упругости и аэродинамики: $\sigma_{ij}n_j = p_i$, где σ_{ij} – тензор напряжений; n_j – вектор нормали к поверхности; p_i – вектор внешних сил $p_i = pn_i$, где p – давление жидкости на поверхности лопатки; $\frac{\partial p}{\partial n} = \vec{n}\nabla\tau$, где τ – тензор сдвиговых напряжений; для

температуры T : $\lambda_g \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_g = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s$, $T|_g = T|_s$ λ – коэффициент теплопроводности,

индексы s и g обозначают соответственно значения со стороны лопатки и газа.

Для интегрирования уравнений аэродинамики используется расчетная сетка О-Н типа, в которой узлы О-сетки перемещаются вместе с узлами, расположенными на поверхности лопатки. Степень перемещения узла зависит линейно от расстояния до поверхности лопатки.

3. Объект исследования

Объектом моделирования было выбрано турбинную лопатку стандартной конфигурации №4 [6] с характерными размерами: хорда $c = 0,0744$ м; высота $h = 0,04$ м. Лопатка была снабжена каналами охлаждения, внешний вид представлен на рис. 1.

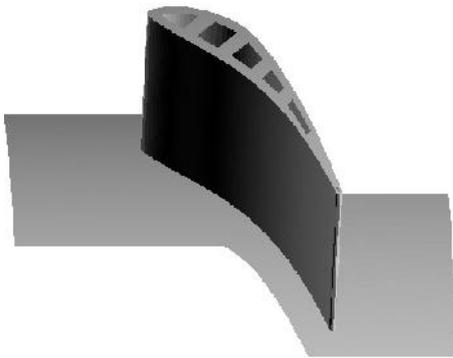


Рис. 1. Лопатка четвертой стандартной конфигурации с охлаждающими каналами

Численное моделирование уравнений выполнялось со следующими граничными условиями: температура заторможенного потока $T_0 = 1000$ К; давление заторможенного потока $p_0 = 205800$ Па; давление на выходе $p_2 = 121200$ Па; угол натекания потока $\beta = -44,5^\circ$; остальные параметры газа соответствовали воздуху при заданной температуре; характеристики материала лопатки соответствовали углеродистой стали.

Имелось два варианта граничных условий для температуры на поверхности лопатки: вариант №1 – температура охлаждающих каналов лопатки $T_c = 600$ К, на поверхности – условие теплообмена; вариант №2 – температура лопатки постоянна $T = 300$ К, на поверхности – адиабатическое условие. Начальным условием для деформации лопатки была линейная комбинация первых четырех собственных форм колебаний с относительной амплитудой $a_0 = 0,001$.

4. Результаты

Результаты моделирования представлены на табл. 1 в виде значений собственных частот колебаний по первым четырем собственным формам для вариантов № 1 и 2. Частоты колебаний лопатки определялись в результате частотного анализа сдвига узлов расчетной сетки.

Таблица 1. Собственные частоты колебаний лопатки, Гц.

форма №	1	2	3	4
вариант №1	4247,205	6521,076	9207,177	12657,11
вариант №2	4914,039	7645,44	10657,43	14898,55

Представленные результаты для варианта №1 немного отличаются от полученных в работе [4], что связано, в основном, с иным распределением температуры, полученным в результате данного расчета, а также взаимодействием лопатки с потоком.

На рис. 2 представлено изменение амплитуд колебаний лопатки относительно начальных значений по первым четырем собственным формам с течением времени для варианта №1, на рис. 3 – для варианта №2. Амплитуда колебаний получена по данным смещения узлов на поверхности лопатки с использованием скользящего по времени конечного фильтра для каждой собственной частоты. В целом амплитуда для обоих вариантов имеет тенденцию к снижению, таким образом, демонстрируя демпфирование колебаний, для варианта №1 несколько большее.

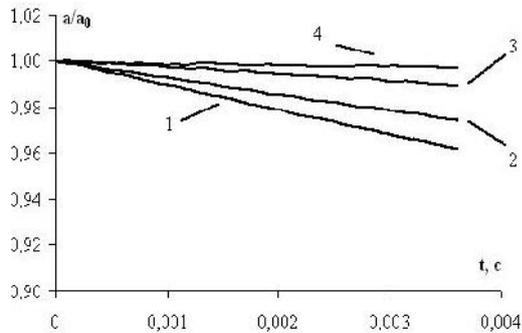


Рис. 2. Относительная амплитуда колебаний лопатки, вариант №1: 1 – первая форма; 2 – вторая форма; 3 – третья форма; 4 – четвертая форма

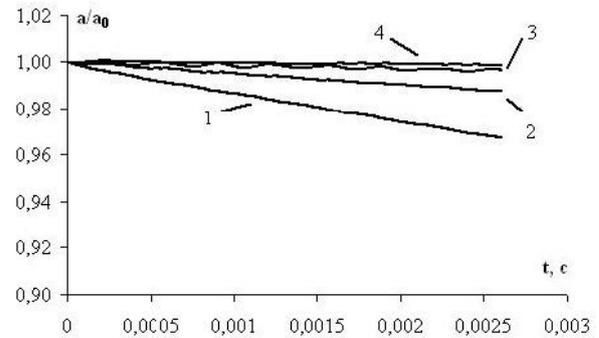


Рис. 3. Относительная амплитуда колебаний лопатки, вариант №2: 1 – первая форма; 2 – вторая форма; 3 – третья форма; 4 – четвертая форма

Характер развития колебаний в основном зависит от работы аэродинамических сил по перемещению лопатки. В случае если работа для определенной собственной формы колебаний имеет положительный знак, возникают условия для увеличения амплитуды колебаний для данной формы. Для определения условий возбуждения или демпфирования колебаний лопатки необходимо знать знак работы аэродинамических сил. Знак работы определяется сдвигом фазы колебаний аэродинамических сил по отношению к колебаниям лопатки для каждой собственной формы. Эти значения представлены на табл. 2. Значения фаз получены с помощью частотного анализа аэродинамических сил после разложения последних по собственным формам.

Таблица 2. Фаза колебаний аэродинамических сил.

форма №	1	2	3	4
вариант №1	-55°	-127,5°	-88°	-80°
вариант №2	-51°	-65,5°	-68,5°	-94,5°

Полученные значения фазы означают отрицательную работу по первым четырем собственным формам колебаний. Отрицательная работа приводит к демпфированию колебаний по данным формам, о чем свидетельствует рис. 2 и 3, на которых видно уменьшение амплитуды колебаний. Данный результат хорошо согласуется с результатами экспериментальных и теоретических исследований, которые показывают демпфирование колебаний лопаток при межлопаточном угле сдвига фаз, равным 0°. Значения фаз для форм №2 и 3 отличаются довольно значительно, что связано с заметной разницей в частотах для соответствующих форм.

Степень демпфирования колебаний можно оценить с помощью определения логарифмического декремента колебаний: $D = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)}$, где a – амплитуда колебаний, T – период колебаний. На табл. 3 представлены значения среднего по времени логарифмического декремента колебаний для вариантов №1 и 2 и соответствующим собственным формам колебаний.

Таблица 3. Среднее значение логарифмического декремента колебаний.

форма №	1	2	3	4
вариант №1	0,002509	0,001109	0,000319	0,0000659
вариант №2	0,002591	0,000635	0,000123	0,0000332

По результатам из табл. 3 видно, что основное демпфирование колебаний происходит по 1-й собственной форме, которая представляет собой преимущественно изгибные колебания. Для вариантов №1 и 2 значения для 1-й формы приблизительно равные, по остальным формам для варианта №2 значения меньше вдвое. Такое поведение связано, очевидно, с частотой колебаний лопатки. Увеличение демпфирования колебаний при увеличении частоты подтверждены и другими исследованиями [2].

Представленные данные показывают, что частоты собственных колебаний лопаток имеют значительное влияние на демпфирование автоколебаний. Хотя величины демпфирования имеют одинаковый знак, но сами величины, а также фазы колебаний аэродинамических сил существенно отличаются. Такое отличие приводит к изменению границ устойчивости автоколебаний лопаток, что может при определенных условиях стать причиной возникновения неконтролируемых автоколебаний. В свою очередь на величины собственных частот влияет распределение температуры в лопатке, следовательно, учет тепловых явлений в задаче определения устойчивости колебаний имеет большое значение.

5. Заключение

Представленные результаты численного моделирования аэротермоупругих колебаний лопатки газовой турбины, обтекаемой потоком вязкого газа хорошо соответствуют результатам других экспериментальных и теоретических исследований, что демонстрирует адекватность используемой математической модели. Используемый метод моделирования аэротермоупругих колебаний лопаток турбомашин, учитывающий влияние распределения температуры в лопатке, может использоваться в задачах определения границ устойчивости колебаний лопаток в турбомашинах.

Список литература: 1. Воробьев Ю.С. Влияние температурной неоднородности на колебания охлаждаемых монокристаллических лопаток газовых турбин [Текст] / Ю.С.Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // Вестник двигателестроения. – №3 – 2009. – С. 140-143. 2. Гнесин В.И. Аэроупругое поведение последней ступени турбомшины на номинальном и частичном режимах в трехмерном потоке вязкого газа [Текст] / В.И. Гнесин, Л.В. Колодяжная, Р. Жандковски // Пробл. машиностр. – Т.12, №6, – 2009. – С. 8-18. 3. Быков Ю.А. Численное моделирование течения в решетке колеблющихся профилей с учетом теплообмена [Текст] / Пробл. машиностр. – Т.12, №5 – 2009. – С. 36-41. 4. Быков Ю.А. Численное моделирование упругих колебаний лопаток турбомашин [Текст] / Ю. А. Быков, В. И. Гнесин // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – №3/7. – 2011. – С. 62-65. 5. Wilcox D.C.

Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models [Текст] // AIAA J. – 1988. – 26, № 11. – P. 1299-1310. 6. Bolcs A. Aeroelasticity in Turbomachines. Comparison of Theoretical and Experimental Cascade Results [Текст] / A. Bolcs, T.H. Fransson // Communication du Laboratoire de Thermique Appliquée et de Turbomachines, Lausanne, EPFL. – 1986. – №13. – 230 p.
Поступила в редколлегию 05.09.2011

УДК 621.43

И.А. ДУДНИКОВ, канд. техн. наук, декан, Полтавская государственная аграрная академия

В.В. ДУДНИК, ассист., Полтавская государственная аграрная академия

А.В. КАНИВЕЦ ассист., Полтавская государственная аграрная академия

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА УСИЛИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

Изложены вопросы определения параметров напряженного состояния материала деталей при его пластическом деформировании.

Ключевые слова: деформированное состояние, уравнение пластичности, напряжение, контактная поверхность.

Викладено питання визначення параметрів напруженого стану матеріалу деталей при його пластичному деформуванні.

Ключові слова: деформований стан, рівняння пластичності, напруження, контактна поверхня.

Outlines the issues determining the parameters of the stress state of the material in detail his plastic deformation.

Keywords: deformed state, the equation of plasticity, stress, contact area.

1. Введение

Обработка металлов давлением при изготовлении или восстановлении деталей машин основана на пластичности металлов и сплавов.

В зависимости от формы и размеров детали, а также свойств деформируемого металла или сплава применяют различные технологические процессы обработки давлением.

В настоящее время находит широкое применение метод пластического деформирования поверхности деталей с применением вибрационных колебаний обрабатывающего инструмента, наносимых на обрабатываемую поверхность деталей при изготовлении или восстановлении.

2. Постановка проблемы

В настоящее время приоритетным является мнение о том, что при деформировании поверхностного слоя детали существенное значение имеет метод поверхностного пластического деформирования. В работах различных авторов используются разные подходы и методы для оценки свойств, что затрудняет процесс проектирования упрочняющей технологии.

3. Анализ основных исследований и публикаций по данной проблеме

Пластичность металла способствует достаточно изменять форму обрабатываемой детали без разрушения.