

для коэффициентов разложения, как в методе конечных разностей.

Получены удовлетворительных результатов с использованием разностных схем, имеющих второй порядок классической аппроксимации на равномерных сетках для расчета гладких течений. Дальнейшие усилия были направлены на разработку теоретических и практических приемов построения высокоточных конечно-элементных и разностных схем для течений с разрывами (ударные волны, контактные разрывы и т.д.). В последнее десятилетие получили распространение в вычислительной практике несогласованные конечные элементы, допускающие конечные разрывы на стыке двух соседних геометрических элементов. Такой подход позволяет повысить точность решения, не расширяя шаблон аппроксимации оператора задачи [2,3].

Для достижения заданной точности решения полученной дискретной задачи необходим контроль погрешностей связанных с исходными данными, аппроксимацией, конечностью разрядной сетки вычислительной техники. Часто в дискретной модели используются точные соотношения, реализуемые итерациями или их приближенным (линеаризованным) представлением. Так, в массовой операции распада произвольного разрыва, в разностной схеме Годунова используется итерационное решение или точное решение для ее акустического приближения.

В докладе представлены некоторые результаты расчета сложных турбулентных газодинамических течений в межлопаточных каналах турбомашин на основе схемы С. К. Годунова повышенного порядка точности на гладких решениях:

- течение в решетке Ходсона на расчетном и нерасчетном режимах обтекания (угол атаки – 20,3°);
- вторичные течения в межлопаточном канале турбомашин (расчет и эксперимент);
- следовые особенности в плоской трехрядной решетке. Резонансы;
- нестационарное течение в ступени турбины ГТД с охлаждаемыми лопатками;
- влияние пространственной формы лопаток на структуру трехмерного течения (саблевидность, окружной и осевой навал лопаток).

ЛИТЕРАТУРА

1. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. Москва: Мир. – 1988. – 352с.
2. Волков А.В., Ляпунов С.В. Исследование эффективности использования численных схем высокого порядка точности для решения уравнений Навье–Стокса и Рейнольдса на неструктурированных адаптивных сетках // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. – 2006. – т.46, №10. – С.1894 – 1907.
3. Cokburn B. Discontinuous Galerkin methods for convection-dominated problems // High-Order Meth. Comput. Phys. – 1999. – v.9. – P.69–224.

ТЕРМІЧНЕ ІМПУЛЬСНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ПІВПРОСТОРУ З ВРАХУВАННЯМ МІКРОСТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В МАТЕРІАЛІ

*Васильєва Л.Я., Жук Я.О.

Миколаївський національний університет, Україна
Київський національний університет, Україна

Моделювання процесів поверхневої температурної обробки для прогнозування бажаних властивостей і вибору оптимальних параметрів процесу є важливою задачею. Для аналізу особливостей напружено-деформованого стану, що виникає внаслідок теплового опромінення матеріалів, які можуть зазнавати мікроструктурних перетворень (МСП), необхідно використовувати постановку динамічної зв'язаної задачі термомеханіки, модифіковану відповідним чином [1].

В роботі використовується така постановка із залученням узагальненої узгодженої з термодинамікою необоротних процесів моделі Боднера–Партома для описання фізично нелінійної поведінки металічних матеріалів в широкому інтервалі температур. Модель ґрунтується на застосуванні термомеханічного формалізму для середовищ із внутрішніми змінними стану. Модифікація моделі з метою врахування МСП внаслідок швидкого нагріву і наступного охолодження виконана в роботі [2].

Розглядається півпростір $z > 0$, $0 < r < \infty$, на поверхні $z = 0$ якого задають граничні умови імпульсного термічного навантаження

$$q_s = \begin{cases} q_0 \sin \frac{\pi}{t_q} t, & t \leq t_q, \\ 0, & t > t_q; \end{cases} \quad (1)$$

де q_0 – параметр теплового навантаження, t_q – інтервал дії імпульсу.

Припускається, що від нуля відмінні лише осьова компонента переміщення u_z , причому $u_z = u_z(z, t)$, а також температура $\theta = \theta(z, t)$. З цих припущень задача для півпростору еквівалентна задачі для стержня $0 < r < R$, $z > 0$, на бічній поверхні якого реалізуються умови жорсткого гладкого контакту і теплоізоляції $u_r = 0$, $\sigma_{rz} = 0$, $\partial\theta/\partial r = 0$, $r = R$, $z > 0$ з умовами (1) на торці $z = 0$. Розрахунки проводилися для стержнів радіусом $R = 10^{-6}$ м та довжиною $L = 10^{-3}$ м, $5 \cdot 10^{-3}$ м і $5 \cdot 10^{-2}$ м. Параметри імпульсу: $q_0 = 2 \cdot 10^{11}$ кВт/м², $t_q = 10^{-8}$ с.

Термічне навантаження на границі формує в приповерхневій зоні хвильову і квазістатичну складові процесу при заданих швидкостях навантаження. Напруження в хвилі мають низький рівень $s_i < 1$ МПа.

Еволюція характеристик теплового і напружено-деформованого стану в часі в точці $z = 0$, показана

на рис. 1. Для відображення впливу МСП результати розрахунку без МСП показані штриховими лініями, а з їх врахуванням – суцільними. В процесі, що розглядається доречно виділити три часових інтервали, які пов'язані з МСП. Перший з них це розігрів від $\theta = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$ до $\theta = A_{C1} \cong 780^\circ\text{C}$. В цьому інтервалі вихідна фаза не змінюється, тому всі криві на рисунку співпадають. Другий інтервал, пов'язаний з аустенізацією $\theta \geq A_{C1}$. Ця трансформація не суттєво впливає на напружений стан оскільки протікає при підвищених температурах, при яких матеріал розм'якшений.

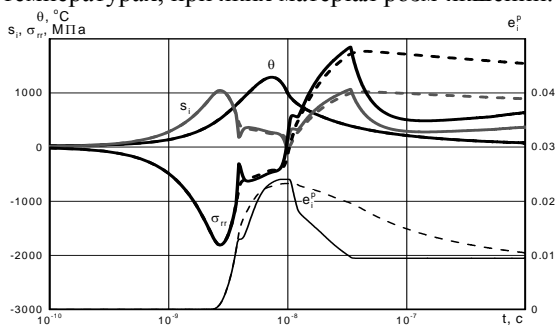


Рис. 1.

В третьому інтервалі має місце мартенситне перетворення, яке призводить до суттєвого зменшення розтягувальних напружень, а також інтенсивностей напружень і деформацій внаслідок збільшення об'єму матеріалу.

Відзначимо, що МСП блокують активний процес непружного деформування, тому з початку мартенситного перетворення має місце розвантаження (див. рис. 1). В розглянутому масштабі характеристик процес є суттєво квазістатичним, оскільки динамічна складова має значно менший рівень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сенченков И.К. Термомеханическая модель растущих цилиндрических тел из физически нелинейных материалов // Прикл. механика. – 2005. – т. 41, № 9. – С. 118–126.
2. Жук Я.О., Червінко О.П., Васильева Л.Я. Уточнена модель структурних перетворень в тонкому сталевому циліндрі при тепловому опроміненні торця // Доповіді НАН України. – 2007. – № 4. – С. 53–58.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТА ТУРБОАГРЕГАТА

Водка А.А., *Красников С.В., Трубаев А.И., Ульянов Ю.Н.

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
Харьков, Украина

Энергетика является одной из приоритетных областей научных исследований в Украине и

мировом сообществе. Несмотря на имеющиеся практические и научные решения в этой области остается еще много нерешенных проблем. Одной из них является эксплуатация и модернизация большинства существующих энергоблоков. Значительная их часть в мире и большинство на Украине близки к выработке проектного ресурса или уже его превысили. Благодаря высокому качеству изготовления и значительному запасу прочности отечественные энергоблоки остаются в рабочем состоянии. При этом на многих энергоблоках фиксируются повышенные уровни вибраций, которые превышают общепринятые в СНГ и мире нормативные параметры. Эксплуатацию таких энергоблоков проводят на основе специально для них созданных правил технической эксплуатации. Как правило, для подобных энергоблоков расчетные исследования основных вибрационных характеристик фундамента не проводились, что создает дополнительные сложности при ремонте энергоблока и его модернизации [1]. Этим определяется актуальность задачи исследования вибрационных характеристик фундамента турбоагрегата.

В представленной работе приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований собственных колебаний фундамента турбоагрегата мощностью 200 МВт. Энергоблок функционирует, но уже выработал свой проектный ресурс. Его эксплуатация на электростанции за последние десять лет регулярно сопровождается ремонтными работами на фундаменте. Математические расчеты вибрационных характеристик фундамента до этого не проводились.

Расчетные исследования были выполнены на основе метода конечных элементов. Основным разрешающим выражением для рассматриваемой задачи является система уравнений:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{q}}(t)\} + \mathbf{K}\{\mathbf{q}(t)\} = 0,$$

где \mathbf{M} – матрица масс, \mathbf{K} – матрица жесткости, $\mathbf{q}(t)$ – вектор перемещений.

При исследовании сходимости было создано несколько конечно-элементных моделей фундамента по ранее разработанным методикам [2], среди которых была выбрана модель, которая показана на рис. 1. Погрешность определения собственных частот с точки зрения математической сходимости расчетов менее 1%. Модель имеет граничные условия в виде жесткого защемления нижней плоскости. Влияние турбоагрегата учитывается системой распределенных масс.

Экспериментальные исследования проводились с помощью переносного низкочастотного многоканального измерительного комплекса вибраций Ультра-В1 [3]. С его помощью были получены диаграммы виброускорений, виброскоростей и виброперемещений в точках измерения вибраций. Диаграмма виброскоростей в одной из точек представлена на рис. 2. Как видно из этого рисунка, фундамент обладает плотным спектром