

ефекти для об'єктів, які будуть більш динамічними та будуть виглядати більш достовірним.

Список літератури: 1. *Mark DeLoura* "Game Programming Gems". – Charles River Media 2000, - 600р., 2. *Герберт Шилдт* "Полный справочник по C". – М.: Вильямс, – 2007. – 704с.

УДК 533.6

ПАПАЗОВ С. В., ЕРШОВ С. В., д-р. техн. наук, профессор

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХМЕРНЫХ НЕВЯЗКИХ ТЕЧЕНИЙ В РЕШЕТКАХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

Введение. Как известно, совершенствование проточных частей турбомашин связано с детальным исследованием структуры потока в лопаточных аппаратах в условиях, когда важную роль играют сжимаемость рабочего тела, а также трансзвуковые режимы обтекания. Поэтому решение задач расчета течений играет важную роль при проектировании проточных частей турбомашин.

Большое количество задач расчета течения в ступенях турбомашин не может быть решено теоретически принимая во внимание их сложность. Часто и физический эксперимент не может решить проблему или из-за невозможности удовлетворительного физического моделирования, или из-за колоссальной стоимости эксперимента и очень большого периода времени, необходимого на его подготовку. Поэтому несмотря на то, что эксперимент как и раньше играет очень важную роль, особенно при исследовании сложных течений, в процессе проектирования отчетливо проявляется тенденция к все более широкому использованию вычислительного подхода.

Эта тенденция во многом связана с соображениями экономии. За последние годы быстродействие ЭВМ росло быстрее, чем их стоимость, вследствие этого стоимость заданного расчета фантастически уменьшилась.

Основной особенностью вычислительного подхода к решению задач расчета течения в проточных частях турбомашин является то, что уравнения, которые описывают течение жидкости или газа, решаются численно.

Выбор численного метода для расчета аэродинамических течений играет важную роль. В наше время среди численных методов газовой динамики достаточно популярной является разностная схема Годунова и ее модификации повышенной точности.

В рамках данной работы на языке программирования Fortran разработана программа, позволяющая проводить численное моделирование двухмерных невязких течений в решетках аэродинамических профилей. Был проведен ряд тестовых расчетов:

- расчет течения в турбинной решетке профилей;

- расчет течения в компрессорной решетке профилей;
- расчет обтекания симметричного аэродинамического профиля NASA 0012;
- расчет обтекания аэродинамического профиля RAЕ 2822.

Постановка задачи. Задачей данной работы является разработка программы расчета течения невязкого сжимаемого газа в решетках аэродинамических профилей. В каждой из решеток рассматривается только один межлопаточный канал в предположении, что в других каналах той же решетки течение в точности такое же. Расчетные области, которые рассматриваются, ограничены стенками (поверхности лопаток) и проницаемыми границами (граница "входа", граница "выхода").

Теоретические основы. Задача решается методом установления по времени. Этот метод заключается в получении стационарного решения нестационарных уравнений, которыми описывается течение, при стационарных граничных условиях на неподвижных границах расчетной области и достаточно произвольных начальных условиях.

В качестве математической модели течения невязкого сжимаемого газа в решетке аэродинамических профилей используется система дифференциальных уравнений Эйлера (1), включающая в себя уравнение неразрывности, два уравнения движения и уравнение энергии:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho e \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho e + p u \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$F_2 = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho e + p v \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$e = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{p}{\rho} + \frac{u^2 + v^2}{2}. \quad (5)$$

Здесь Q - вектор консервативных переменных;

F_1 и F_2 – векторы газодинамических потоков;
 ρ - плотность;
 u и v - компоненты вектора скорости;
 p – давление;
 γ - показатель адиабаты;
 e - полная энергия единицы массы.

Выводы. С помощью языка программирования Fortran была разработана программа численного моделирования двухмерных невязких течений в решетках турбомашин. Проведен анализ полученных результатов расчета течений в компрессорной и турбинной решетках профилей. Также были проанализированы численные результаты расчетов обтекания изолированных аэродинамических профилей NASA 0012 и RAЕ 2822. В каждой расчетной области были определены:

- характер и особенности течения невязкого сжимаемого газа;
- области ускорения и торможения потока невязкого сжимаемого газа;
- области сжатия и расширения в потоке;
- волны разрежения, а также скачки уплотнения, возникающие при трансзвуковом режиме течения.

Список литературы: 1. Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р. Плетчер "Вычислительная гидромеханика и теплообмен".–М.: Мир, 1990. – 725с., 2. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / под редакцией С.К.Годунова, Наука, М., 1976, 3. Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе "Теоретическая гидромеханика" (под редакцией И.А. Кибеля, часть вторая, государственное издательство физико-математической литературы, Москва 1963), 4. Расчет смешанных течений в решетках турбомашин. / Соколовский Г.А., Гнесин В.И. – Киев: Наук. думка, 1981. – 184 с.

УДК 539.3

МЕТЕЛЬОВ В. О., БРЕСЛАВСЬКИЙ Д. В., д-р техн. наук, проф.

РІШЕННЯ ДВОВИМІРНИХ ЗАДАЧ ПОВЗУЧОСТІ І ПОШКОДЖУВАНОСТІ МСЕ

Вступ. У світовому сучасному авіаційному, космічному і енергетичному машинобудуванні широко впроваджуються нові конструкційні матеріали, в тому числі металеві композитні сплави. Разом з тим в теоретичних розробках з механіки композитних матеріалів і конструкцій в даний час практично відсутні адекватні моделі і методи розрахунків на повзучість і тривалу міцність елементів конструкцій з композитних матеріалів, що дозволяє вважати розробки в цьому напрямку актуальними в науковому відношенні.

Постановка задачі. Метою роботи є розвиток методу розрахунку на повзучість і тривалу міцність трансверсально-ізотропних плоских тіл і вдосконалення програмного забезпечення для розрахунків деформування і прогнозування часу до руйнування цих тіл при повзучості; вирішення прикладних задач повзучості плоских елементів конструкцій з малими отворами.

Теоретичні основи. Плоскі задачі теорії повзучості зводяться до розв'язання початково-крайових задач, які необхідно доповнити рівняннями стану повзучості. Початково-крайові задачі повзучості конкретизуються для різних матеріалів вибором виду рівнянь стану. Для ортотропних матеріалів ці рівняння приймають вигляд:

$$\underline{\dot{c}} = \frac{\underline{\dot{D}}}{\sigma_V} \left(\underline{a} + \frac{1}{\sigma_2} \mathbf{B} \underline{\sigma} \right). \quad (1)$$

Розв'язок виконуємо методом скінченних елементів (МСЕ) [1], використовуючи варіаційний функціонал Лагранжа, переформульований у швидкостях [1]:

$$J = \int_V \left(\frac{1}{2} \underline{\dot{\epsilon}}^T \underline{D} \underline{\dot{\epsilon}} - \underline{\dot{\epsilon}}^T \underline{\dot{\sigma}}^* \right) dV - \int_{S_1} \underline{\dot{u}}^T \underline{p} dS. \quad (2)$$

Розв'язком задачі про пружне деформування тіла визначаються початкові умови для задачі повзучості у вигляді розподілу переміщень, деформацій та напружень в тілі.

В роботі застосовуються тензорно-лінійні співвідношення у вигляді визначальних рівнянь ортотропної повзучості тіл з урахуванням пошкоджуваності, отримані на основі термодинамічно несуперечливих допущень про існування потенціалів для компонент тензора швидкостей деформацій повзучості і компонент тензора другого рангу швидкостей пошкоджуваності [2, 3]. Рівняння стану мають вигляд тензорно-лінійного зв'язку між тензором швидкостей деформацій повзучості і тензором напружень з коефіцієнтами у вигляді функцій, залежних від спільних інваріантів тензорів матеріальної постійної і ефективного напруження. Для тензорів швидкостей деформацій повзучості і пошкоджуваності кінетичні рівняння є рівняннями стану для трансверсально-ізотропних матеріалів при повзучості [4].

До розрахунків застосовано створений в НТУ «ХПІ» програмний комплекс на мові програмування C++.

Аналіз результатів. Для перевірки правильності розрахунків програмного комплексу у даній роботі розглядалась тестова задача Кірша про рівномірний розтяг пластини з круглим отвором. Було встановлено, що максимальні напруження виникають на краю отвору, що якісно відповідає

відомим аналітичним розв'язкам. Проведено порівняння значень часу до руйнування і інтенсивності напружень в концентраторах при повзучості, з використанням різних скінченно-елементних сіток.

Висновки. Рівняння стану повзучості з урахуванням пошкоджуваності для трансверсально-ізотропних матеріалів у векторно-матричній формі, які були запрограмовані у програмному комплексі, застосовано до чисельних досліджень. Проведено дослідження збіжності розв'язків задачі повзучості пластини з отвором при розтягу.

Список літератури: 1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: МИР, 1975. – 541 с., 2. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с. 3. *Ю. Н. Работнов* Ползучесть элементов конструкций. - М: Наука, 1966. – 752 с., 4. *О.К. Морачковский А.А. Пасынок* Исследование влияния на ползучесть материалов приобретенной анизотропии вследствие предварительной ползучести. – Харьков: Вестник ХГПУ, 1998. – Вып. 27. – 197-203 с.

УДК 621.7

ОКОРОКОВ В. О., ЛЬВОВ Г. І., д-р техн. наук, проф.

ОПТИМАЛЬНЕ АВТОФРЕТУВАННЯ ТОВСТОСТІННОГО ЦИЛІНДРУ

Робота присвячена аналізу впливу пошкоджуваності матеріалу на процес автофретування, а також знаходженню оптимальних режимів автофретування для товстостінних труб.

Товстостінні труби широко застосовуються в багатьох галузях легкої, важкої, а також військової промисловості. Їх використовують для транспортування рідини і газу, в тому числі і під високим тиском. Постійне зростання військової потужності танків неодмінно потребує підвищення характеристик міцності танкової гармати. Для придання снаряду більшої початкової швидкості при пострілі необхідно збільшувати тиск від вибуху порохових газів в каналі ствола. Але величина граничного тиску обмежена міцністю матеріалу гармати. Для підвищення міцності товстостінних труб навантажених внутрішнім тиском часто використовують автофретування. Автофретування ґрунтується на утворенні значних пластичних деформацій, тому в матеріалі можуть виникати пошкодження. Але не дивлячись на те, що на внутрішніх шарах труби в місці максимальних пластичних деформацій з'являються пошкодження, труба ще деякий час до руйнування може витримувати підвищення тиску. Пошкоджуваність матеріалу призводить до зниження залишкових напружень, тому знаходження оптимальних режимів автофретування має велике практичне значення.

Для розрахунку процесів автофретування використовувався критерій