

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МЕТОДА НЕЛИНЕЙНЫХ ГАРМОНИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМ ГОДУНОВСКОГО ТИПА НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

О.Б. Бутаков

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, butakovoleg@gmail.com

Метод нелинейных гармоник, впервые предложенный в работе [1], является мощным инструментом моделирования периодических нестационарных гидродинамических течений, в частности течений в турбореактивных установках. Этот подход предполагает решение осредненных по времени уравнений Навье-Стокса, дополненных комплексными уравнениями переноса относительно амплитуд гармоник нестационарных возмущений:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \bar{\mathbf{Q}} + \mathbf{Q}' = \bar{\mathbf{Q}} + \sum_k \left(\tilde{\mathbf{Q}}_k e^{i\omega t} + \tilde{\mathbf{Q}}_{-k} e^{-i\omega t} \right), \\ \nabla \cdot \bar{\mathcal{F}}(\bar{\mathbf{Q}}, \mathbf{Q}') &= 0, \quad i\omega \tilde{\mathbf{Q}}_k + \nabla \cdot \tilde{\mathcal{F}}_k(\tilde{\mathbf{Q}}_k, \bar{\mathbf{Q}}) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения (1) метода нелинейных гармоник обычно [1] решаются методом установления по псевдвремени. В литературе тема пространственной дискретизации уравнений (1) встречается не часто. Обычно применяются центральные схемы с сенсорами давления, использование которых на неструктурированных сетках может сопровождаться возникновением неустойчивостей.

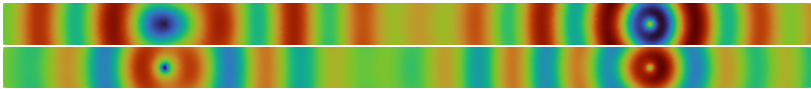


Рис. 1: Распространение возмущений плотности от двух точечных источников с некрatными амплитудами, полученное методом нелинейных гармоник с применением гoдуновских схем

В свою очередь, при расчете на неструктурированных сетках успешно применяются схемы гoдуновского типа с реконструкциями, позволяющие моделировать с высокой точностью широкий спектр задач. Мы рассмотрим вопрос построения гoдуновских схем для уравнений (1). Ключевой частью Гoдуновской схемы является приближенный решатель задачи Римана. Мы построим аналоги широко-известных решателей Local-Lax-Friedrichs и Roe для уравнений метода нелинейных гармоник, которые применим в схеме с

кусочно-линейными реконструкциями методом наименьших квадратов.

Будут приведены результаты тестовых расчетов, демонстрирующие высокую точность и эффективность предложенных разностных схем.

Работа поддержана грантом РФФ 21-71-10100.

Литература

1. He, Li and Wei Ning. Efficient Approach for Analysis of Unsteady Viscous Flows in Turbomachines. *AIAA Journal* 36 (1998): 2005-2012.