

Ускорение сходимости нестационарных расчетов течений жидкости в гидротурбине с использованием многосеточных методов*

А.К. Рогачева¹, Д.В. Чирков¹

¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследуются способы ускорения сходимости итерационного процесса при решении нестационарных задач движения несжимаемой жидкости. За основу берется предложенный ранее метод искусственной сжимаемости с неявной конечно-объемной аппроксимацией уравнений Навье – Стокса и приближенной LU-факторизацией. В качестве альтернатив LU-факторизации выбран метод минимальных невязок с многосеточным и ILU-предобуславливателем из библиотеки HYPRE. Сравнение подходов по скорости сходимости и времени счета проводится на задаче нестационарного течения в проточном тракте гидротурбины.

Ключевые слова: нестационарные течения, метод искусственной сжимаемости, приближенная LU-факторизация, многосеточные методы, GMRES, гидротурбина, HYPRE.

Введение

В работе исследуются способы ускорения сходимости итерационного процесса при численном решении нестационарных уравнений Навье – Стокса несжимаемой жидкости. За основу берется неявная схема конечных объемов, реализованная в пакете программ CADRUN [1, 2]. В [1] для связи полей скорости и давления используется метод искусственной сжимаемости. При моделировании нестационарных задач во все уравнения системы вводятся производные по псевдовремени, что делает систему эволюционной по псевдовремени и позволяет находить решение на каждом шаге по физическому времени через итерационное установление по псевдовремени. После линеаризации неявная схема преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Матрица системы представляет собой большую разреженную матрицу. В практических задачах размер этой матрицы достигает нескольких миллионов строк ($4N$, где N – число ячеек сетки). В каждой строке матрицы максимум 28 ненулевых элементов. В текущей реализации метода для решения данной СЛАУ применяется метод приближенной LU-факторизации с явной реализацией граничных условий [1]. Такой подход требует порядка 1000 итераций для достижения сходимости на каждом временном шаге, что приводит к значительным вычислительным затратам, даже при использовании блочного распараллеливания на десятки вычислительных ядер. Указанные временные затраты делают критически важным поиск методов ускорения сходимости алгоритма, особенно при выполнении серийных нестационарных расчетов. Решению данной проблемы была посвящена работа [3], где для решения исходной СЛАУ использовались методы GMRES и PARDISO, реализованные в библиотеке Intel MKL. В [3] авторам удалось добиться ускорения итерационной сходимости, однако сокращения времени счета достичь не удалось, что может быть связано с отсутствием предобуславливателей.

В данной работе исследуются альтернативные подходы к решению СЛАУ, способные существенно сократить требуемое количество итераций и, соответственно, общее время вычислений. В качестве альтернативного метода решения СЛАУ был выбран метод минимальных невязок (GMRES) с алгебраическим многосеточным предобуславливателем и с ILU-предобуславливателем, реализованными в библиотеке HYPRE [4, 5]. Кроме этого, при составлении системы были учтены граничные условия на всех границах расчетной области (неявная реализация граничных условий). Альтернативные методы были внедрены в параллельную версию пакета CADRUN и протестированы на задаче нестационарного турбулентного течения в радиально-осевой гидротурбине Бурейской ГЭС.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-21-00195.