

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ПРИ ПОВОРОТЕ ЛОПАТОК ВРА

Бондаренко Г.А., профессор; Юрко И.В., аспирант

Особенность состоит в том, что обычно численное моделирование производится для статической модели, т.е. модели с неизменной геометрией. При этом если исследовать модели с другими конструктивными размерами, то возникает необходимость создавать отдельно для каждого варианта свою твердотельную модель. Если же выполняется моделирование ступени с входным регулирующим аппаратом (ВРА), то модель ступени неизменна, а угол поворота лопаток ВРА является изменяемым параметром. Сложность такого моделирования также проявляется в том, что для каждого задаваемого значения угла поворота необходимо рассчитывать характеристики ступени в широком диапазоне производительностей. При этом, как известно, более высокая точность достигается в области номинальных значений коэффициента расхода, ухудшаясь при отклонении в сторону больших и меньших расходов. В случае с ВРА при повороте лопаток дополнительно возникают проблемы, связанные с заведомо нерасчетным натеканием на решетку рабочего колеса. Это очевидно приводит к гораздо более сложной структуре потока по сравнению с исходным вариантом.

Учитывая, что результаты подобного моделирования не известны, была поставлена цель проверить возможность применения численного моделирования для такого сложного случая.

Численное моделирование проводилось с применением программного комплекса FlowVision. Время решения поставленной задачи является одним из основных показателей эффективности численного моделирования. А для задач с изменяемой геометрией этот параметр, наравне с точностью полученных результатов, является критически важным. Поэтому необходимо было исследовать факторы, влияющие на время расчёта задачи. Такими факторами являются: 1) качество построения твердотельной модели, 2) математическая модель, 3) количество расчётных ячеек, 4) шаг интегрирования.

Специальное исследование позволило выбрать рациональную точность отрисовки твердотельной модели в программе SolidWorks, так как она влияет на время расчёта итераций.

Во FlowVision для задач компрессоростроения применяются две модели: «модель слабосжимаемой жидкости» и «модель полностью сжимаемой жидкости». В большинстве компрессоров, скорости во входном участке ступени перед ВРА составляют $M < 0,2$.

Показана возможность применения математической модели «слабосжимаемая жидкость» для исследования течения в ВРА путём сравнения с результатами экспериментального исследования на стенде статических продувок. Данная модель позволила значительно сократить время расчёта, при этом погрешность вычисления находилась в допустимых пределах.

Количество расчетных ячеек определяется размерами самой ячейки. Для более детального изучения структуры потока необходимо измельчать расчётную сетку. Так как течение в каналах рабочего колеса и ВРА носит осесимметричный характер, появляется возможность применения сектора модели, чтобы уменьшить число ячеек и тем самым увеличить скорость расчёта. Для обоснования возможности использования сектора для расчёта, были вычислены интегральные значения газодинамических параметров для полной модели ВРА и для секторов, равных 1/3, 1/5, 1/15 части ВРА. Разница между полученными результатами не превышает 4%, а при большем измельчении расчетной сетки, разница не превышает погрешности вычисления. Так же рассмотрено влияние дискретизации (измельчение ячеек) расчетной сетки на полученные результаты. Результаты моделирования показали, что с уменьшением размера элементов расчетной сетки коэффициент потерь в ВРА уменьшается. Это связано с более точным расчетом течения и выявлением размера вихрей, образующихся за лопатками аппарата.

Время расчёта задачи напрямую зависит от шага интегрирования, который задаётся либо постоянным, или исходя из числа Куранта-Фридрихса-Леви (CFL). Общее время расчёта задачи можно выразить так: $t_{\text{ОБЩ}} = \frac{T}{\tau} \cdot t_{\text{ИТЕР}} = \frac{T}{\tau_k \cdot CFL} \cdot t_{\text{ИТЕР}}$, где T – время сходимости задачи; τ_k – явный шаг интегрирования, равный минимальному отношению характерного размера ячейки к модулю скорости в ячейке; $t_{\text{ИТЕР}}$ – время расчёта одной итерации, зависящее от числа расчётных ячеек.

Было определено, что переменная T уменьшается с увеличением угла поворота ВРА. При измельчении расчетной сетки или с увеличением скорости в расчётной области, значение τ_k уменьшается. Сравнивались значения газодинамических параметров при задании разных чисел CFL. Показана возможность расчёта задач течения газа ($M < 0,3$) с большими числами CFL без потери точности результатов. Были сопоставлены результаты расчётов ступени компрессора при использовании k-ε и SST моделей турбулентности. Анализ картины течения потока в межлопаточных каналах ВРА и рабочего колеса при разных моделях турбулентности не выявил существенных различий. Поэтому можно отдавать предпочтение модели SST, сочетающей в себе свойства k-ε и k-ω моделей.

Определение предполагаемого времени расчёта задачи помогло оценить временные затраты на проведение численного эксперимента, а знание особенностей численного моделирования позволило сократить время решения поставленных задач в 5-10 раз.