

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СУДОВЫХ ВИНТО-РУЛЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ В СРЕДЕ FLOWVISION

Ю.М. Король *к-т техн. наук, доцент*, О.Н. Рудько *аспирант*
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина

Движительно-рулевой комплекс является основным источником сил, приводящих судно в движение. При выборе и проектировании ДРК приходится руководствоваться не только необходимостью обеспечить судну заданные маневренные качества, но и рядом других требований, связанных с обеспечением ходкости судна, с условиями размещения ДРК и т.д. Поэтому задача выбора оптимального ДРК для проектируемого судна требует обширных, трудоёмких экспериментальных исследований ввиду большого числа варьируемых параметров (характеристик гребного винта, руля, кронштейна и их взаимного расположения).

Одним из методов исследования ДРК судна является физический эксперимент, который проводится в опытовом бассейне, аэродинамической или кавитационной трубе. Это один из классических методов исследования, позволяющий получить достоверные результаты характеристик ДРК при различных углах перекладки руля, скорости набегающего потока и частоты вращения гребного винта, однако достаточно трудоёмкий и дорогостоящий.

Теоретические методы исследования действия ДРК, как средства управления судном, эффективны для малых углов атаки и коэффициентов нагрузки гребных винтов. В частности, вихревая теория требует больших ресурсов, однако недостаточно точно учитывает форму гребного винта, вязкостные составляющие, и применима лишь при больших поступях гребного винта и малых углах перекладки руля.

Ещё одним методом исследований ДРК является метод имитационного моделирования. Реализованные в CFD-пакете программ методы вычислительной гидродинамики являются той ветвью, которая связывает воедино теоретическую и экспериментальную гидроаэродинамику и является эффективным средством моделирования реальных течений. Одним из таких пакетов является [FlowVision](#).

Получаемые результаты моделирования задач гидродинамики в среде FlowVision достаточно хорошо согласуются с результатами физического эксперимента при определённых задаваемых параметрах моделирования – начальных значениях, граничных условиях, степени и виде адаптации, размерах расчётной области, схеме расчёта, шага по времени и др.

В ходе численного моделирования исследовалось:

- влияние шага по времени на результаты расчёта;
- влияние выбранной модели турбулентности;
- влияние выбираемой схемы расчёта;
- влияние степени и вида адаптации сетки.

Тестирование полученных результатов проводилось путём сравнения сил и моментов, действующих на ДРК, с данными физического эксперимента, проведенного в университете Саутгемптона (Великобритания) в 1993 году A.F.Molland и S.R.Turnock.

В аэродинамическую трубу с поперечным сечением 2,5×3,0м был помещён движительно-рулевой комплекс, состоящий из гребного винта, руля, кронштейна и привода. Четырёхлопастной гребной винт серии В4.40, диаметр – 0,8м, шаговое отношение – 0,95, дисковое отношение – 0,4. Руль с профилем NACA0020, средняя хорда – 0,667м. Исследовалось влияние частоты вращения гребного винта, углов перекладки руля и скорости потока на силы и моменты, действующие на элементы ДРК.

Для проведения численного эксперимента с помощью инструментов программы Solid Works были построены твердотельные модели руля, кронштейна, привода, гребного винта соответствующих размеров. В ходе создания проекта в программном комплексе FlowVision в бокс, имеющий форму параллелепипеда, при помощи фильтра подвижного тела были помещены элементы ДРК, соответствующие физическому эксперименту. Расставлены граничные условия Входа, Выхода, Стенок. Также задавались угол перекладки руля, частота вращения движителя и скорость набегающего потока.

Математическая модель движения жидкости представляет собой совокупность уравнений, для решения которых используется метод конечных объёмов. В этом методе уравнения интегрируются по объёму каждой ячейки расчётной сетки и по отрезку времени (шаг по времени). В FlowVision имеется возможность расчёта этих уравнений явным и неявным алгоритмом (скошенная и неявная схема). В ходе проведения ряда экспериментов было установлено, что для моделирования винто-рулевых комплексов приемлема неявная схема расчёта.

Во FlowVision имеется возможность выбора модели турбулентности согласно специфике решаемой задачи. Для моделирования данной задачи исследовались следующие модели турбулентности:

- стандартная k-ε модель турбулентности;
- модель турбулентности SST;
- модель турбулентности SA.

Первоначально была задана стандартная k-ε модель турбулентности. Проводился ряд экспериментов с различными шагами по времени при одних и тех же скорости потока, частоте вращения гребного винта и угле перекладки руля. В результате численных экспериментов обнаружено существенное влияние шага по времени на

сходимость процесса расчёта. Установлен предел величины шага, начиная с которого происходит численная неустойчивость решения. Представленные на рис.1 зависимости демонстрируют влияние шага по времени на момент и упор гребного винта при скорости потока 10м/с, частоте вращения гребного винта 2100об/мин и угле перекладки руля 29,6°.

Если для указанных условий шаг по времени равен или меньше 0,00079, то численное решение устойчиво и хорошо совпадает с экспериментальными значениями. На рис.1б наблюдается расхождение процесса после 200 итерации с шагом по времени 0,0025. Кроме того, на этом же рисунке хорошо видно влияние сил трения на результаты расчёта – момент с учётом трения больше чем момент без учёта трения.

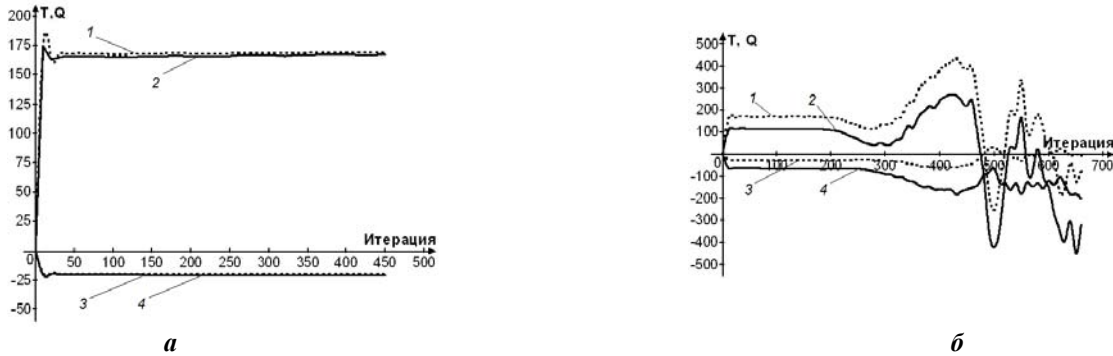


Рис. 1. Влияние шага по времени на сходимость расчёта
(1– упор гребного винта без учёта трения; 2 – упор гребного винта с учётом трения; 3 – момент гребного винта без учёта трения; 4 – момент гребного винта с учётом трения):
а – шаг по времени 0,00079; б – шаг по времени 0,0025

Для надёжного моделирования винто–рулевого комплекса предлагается использовать время одного оборота как физическую величину, которая позволяет вычислить шаг по времени в зависимости от частоты вращения гребного винта и задать эту величину шага при моделировании во FlowVision. Чем больше частота вращения гребного винта, тем меньше оптимальный шаг по времени.

Наиболее эффективной для решения данной задачи выступает модель турбулентности SA. Ниже, на рис.2а, 2б представлены результаты моделирования работы винто–рулевого комплекса при скорости потока 10м/с с частотой вращения гребного винта 2100об/мин. На рис.2а представлен график зависимости угла перекладки руля от коэффициента подъёмной силы руля (кружочками обозначены результаты физического эксперимента, а квадратиками – результаты численного эксперимента). На рис.2б представлен график зависимости угла перекладки руля от коэффициентов упора и момента гребного винта (линиями обозначены результаты физического эксперимента, а квадратиками – результаты численного эксперимента). Таким образом, отмечена достаточно хорошая согласованность результатов физического и численного экспериментов.

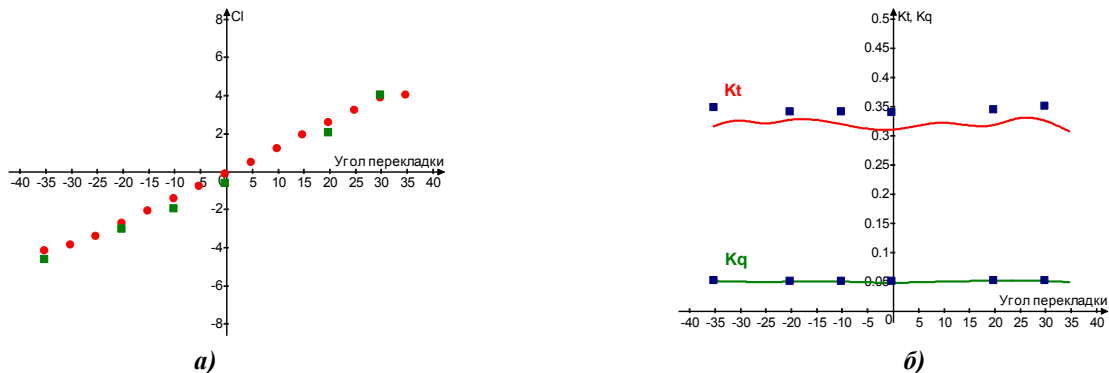


Рис. 2. Сравнение результатов численного и физического экспериментов:
(● – физический эксперимент; ■ – численный эксперимент;
— – физический эксперимент)
а – зависимость коэффициента подъёмной силы руля от угла перекладки руля;
б – зависимость коэффициентов момента и упора гребного винта от угла перекладки руля

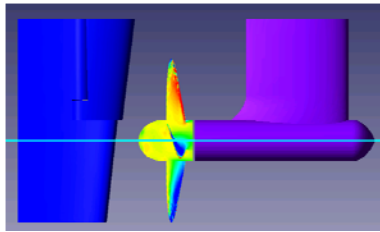
С целью исследования влияния потока на вращающийся гребной винт с заданным углом перекладки руля были заданы слои визуализации Давление и Скорость. На рис.3а представлена картина распределения давления на поверхности гребного винта: повышенное давление на нагнетающей стороне, пониженное давление на

засасывающей стороне. На рис.3б представлена картина распределения скоростей при обтекании ДРК потоком воздуха.

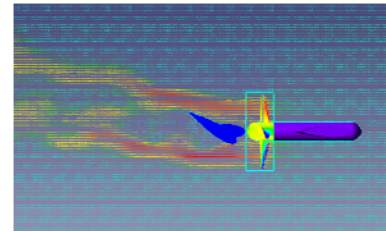
При исследовании влияния степени адаптации сетки по граничному условию Стенка, заданному на поверхности гребного винта, было установлено, что повышение уровня адаптации со второго на третий практически не влияет на результаты расчёта.

Несмотря на невысокую вычислительную эффективность (вычислительная эффективность – это отношение реального времени к времени, затраченному на численный эксперимент), равную 10^{-6} , разработанная технология моделирования винто-рулевых комплексов достаточно эффективна, о чём свидетельствует хорошее совпадение результатов физического и численного экспериментов.

Практическая ценность данной работы состоит как в создании самой технологии моделирования, так и в рекомендациях по выбору параметров моделирования.



a)



б)

Рис.3. Слои визуализации давления и скорости в среде FlowVision:

- a* – распределение давления на поверхности гребного винта;
- б* – распределение скорости при обтекании ВРК потоком воздуха