

Методика вычислений характеристик винта в кольце для малоразмерных летательных аппаратов

А.А. Черненко¹, А.В. Лысенков^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Центральный аэрогидродинамический институт им Н.Е. Жуковского

1. Введение

Аэродинамический расчет служит для введения поправок к экспериментальным данным, для исследования физических эффектов, для визуализации течений. Основным средством для получения точных характеристик воздушных винтов является эксперимент. С.П. Остроухов [1] провел большое количество испытаний воздушных винтов как изолированных, так и в кольце.

В связи с постоянно растущим интересом к малоразмерным беспилотным летательным аппаратам большое количество исследователей использует методы вычислительной аэродинамики для проектирования винтов и других элементов таких аппаратов. В основном в своих исследованиях ученые используют иностранные коммерческие программные комплексы. Однако применение программ собственной разработки, специально настроенных для решения конкретных задач, позволяет разработать методики расчета и получить более точные характеристики. В данной работе проводится расчет аэродинамических характеристик (АДХ) воздушного винта (ВВ) в присутствии и без кольца при помощи пакета прикладных программ EWT-ЦАГИ [2].

2. Пакет прикладных программ EWT – ЦАГИ.

Пакет прикладных программ EWT включает в себя программы для подготовки расчетов (построение геометрий и расчетных сеток, задание краевых условий и различных параметров расчета), солверы для численного решения уравнений аэродинамики и программы для обработки результатов расчетов.

Численный эксперимент в пакете прикладных программ EWT можно представить следующими основными этапами:

1. Построение математической модели геометрии
2. Построение пространственной сетки.
3. Расчет обтекания модели с использованием различных методов.
4. Специфическая обработка результатов расчета.

Численный метод, используемый в EWT, требует построения структурированной расчетной сетки, состоящей из шестигранных ячеек. Грани соседних ячеек совпадают друг с другом. Сеточные линии, т.е. линии, образуемые ребрами ячеек, должны быть непрерывными и начинаться на границах расчетной области.

В пакете прикладных программ EWT в случае задач с вращением решаются уравнения Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса – это осредненные по времени уравнения Навье-Стокса. Выпишем эти уравнения:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\mathbf{F}}(\bar{\mathbf{u}})}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{u}})}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}(\bar{\mathbf{u}})}{\partial z} = 0, \text{ где } \bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho} \tilde{u} \\ \bar{\rho} \tilde{v} \\ \bar{\rho} \tilde{w} \\ \bar{\rho} \tilde{E} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

В решаемой задаче для решения уравнения Рейнольдса используется явно- неявная расчетная схема со сглаживателем [3], основанная на явной расчетной схеме Годунова-Колгана-Родионова [4,5,6].

$$\vec{U}_i^{n+1} = \vec{U}_i^n - \underbrace{\frac{\tau^n}{V_i} \cdot \sum_{\partial E_i} \vec{F}}_{\text{потоки}} + \underbrace{\tau^n \vec{W}_i}_{\text{источники}} \quad (2)$$

Здесь \vec{U} вектор консервативных переменных, векторы их потоков \vec{F} сквозь грани ∂E_i ячейки i , а также вектор источниковых членов \vec{W} . Вектор источниковых членов \vec{W} описывает производство и диссипацию параметров турбулентности.

Для системы уравнений Навье-Стокса, замкнутой моделью турбулентности, рассмотрим схему с линеаризацией, в которой оставлены конвективные члены:

$$\mathbf{R}_i \Delta \vec{u}_i + \sum_{\partial E_i} \mathbf{R}_{NBR} \Delta \vec{u}_{NBR} = -\frac{\tau^n}{V_i} \sum_{\partial E_i} \vec{F}^n + \tau^n \vec{W}^n, \quad (3)$$

где индекс NBR обозначает соседнюю ячейку, имеющую общую грань ∂E_i с ячейкой i . Для каждой ячейки введены квадратные плотные матрицы, по размерности совпадающие с количеством неизвестных в ячейке:

$$\mathbf{R}_i = \underbrace{\mathbf{R}_{\text{конв}i}}_{\text{конвекция}} + \underbrace{\mathbf{R}_{\text{дифф}i}}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\mathbf{R}_{\text{source}i}}_{\text{источники}}, \quad \mathbf{R}_{NBR} = \underbrace{\mathbf{R}_{\text{конв}NBR}}_{\text{конвекция}} + \underbrace{\mathbf{R}_{\text{дифф}NBR}}_{\text{диффузия}} \quad (4)$$

Итерационные методы решения данной СЛАУ, рассматривающие итерационные значения приращений консервативных параметров в соседних ячейках как известные, позволяют сохранить структуру явного метода. Явную схему формально также можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений (правда, матрица этой системы будет единичной). И для решения этой системы также можно применить итерационный метод, дающий, правда, абсолютно точное решение системы за одну итерацию. Обозначим верхним индексом k номер итерации. При этом станут наглядными все отличия явной схемы от рассматриваемой неявной:

$$\mathbf{R}_i \Delta \vec{u}_i^k = -\sum_{\partial E_i} \mathbf{R}_{NBR} \Delta \vec{u}_{NBR}^{\text{итерационное}} - \frac{\tau^n}{V_i} \sum_{\partial E} \vec{F}^n + \tau^n \vec{W}^n - \text{неявная схема},$$

$$\mathbf{I}_i \Delta \vec{u}_i^k = -\frac{\tau^n}{V_i} \sum_{\partial E_i} \vec{F}^n + \tau^n \vec{W}^n - \text{явная схема, } \mathbf{I} - \text{единичная матрица}.$$

В неявной схеме можно выделить слагаемые, отличающие её от явной:

$$\left(\mathbf{I} + \underbrace{\mathbf{R} - \mathbf{I}}_{\text{сглаживатель}} \right)_i \Delta \vec{u}_i^k = -\frac{\tau^n}{V_i} \sum_{\partial E_i} \vec{F}^n + \tau^n \vec{W}^n - \underbrace{\sum_{\partial E_i} \mathbf{R}_{NBR} \Delta \vec{u}_{NBR}^{\text{итерационное}}}_{\text{сглаживатель}} \quad (5)$$

Эти дополнительные слагаемые исчезают при сходимости к стационарному решению. Но в процессе сходимости они обеспечивают устойчивость схемы, сглаживая возмущения, порождаемые неустойчивым при больших шагах по времени явным оператором. Далее эти дополнительные слагаемые будут называться *неявным сглаживателем*.

В общем случае трёхмерных уравнений Рейнольдса получающаяся система линейных алгебраических уравнений будет иметь ленточную матрицу с количеством ненулевых диагоналей, соответствующим неявному шаблону схемы. Каждый блок строк матриц соответствует одной

ячейке. Для решения системы линейных уравнений блочный метод Гаусса-Зейделя с перенумерацией ячеек.

Поставленная задача о нахождении аэродинамических характеристик винта решается в стационарном случае, который реализован путем перехода во вращающуюся систему координат.

Для расчета на вращающихся сетках модифицируется решение задачи Римана о распаде произвольного разрыва. Помимо этого, в программе присутствуют и другие модификации:

- Модификация граничных условий:
 - для условия прилипания – на стенке задается скорость вращения
 - условие непротекания ставится для скорости $V = V_{flow} - V_{side}$
 - для условия «Риман» при определении направления потока учитывается скорость вращения сетки.
- Для явной схемы вводится коррекция на шаг по времени.
- Для неявной схемы модифицируются матрицы Роу.

3. Постановка задачи

Поставленной задачей является нахождение влияния кольца на аэродинамические характеристики воздушного винта.

Для решения поставленной задачи использовалась следующая методология. Геометрия винта и кольца была передана сотрудником ФАЛТ МФТИ Серохвостовым С.В. Первым этапом стало построение пространственной расчетной сетки. На втором этапе ставились начальные и граничные условия решаемой задачи. Завершающий этап - обработка полученных данных. На этом этапе необходимо проанализировать полученные характеристики и выявить зависимость влияния кольца на аэродинамические характеристики винта.

Для решения поставленной задачи было построено две расчетные сетки: с кольцом и без кольца. Обе расчетные сетки состоят из двух частей: вращающейся (рисунок 3.1) и стационарной.

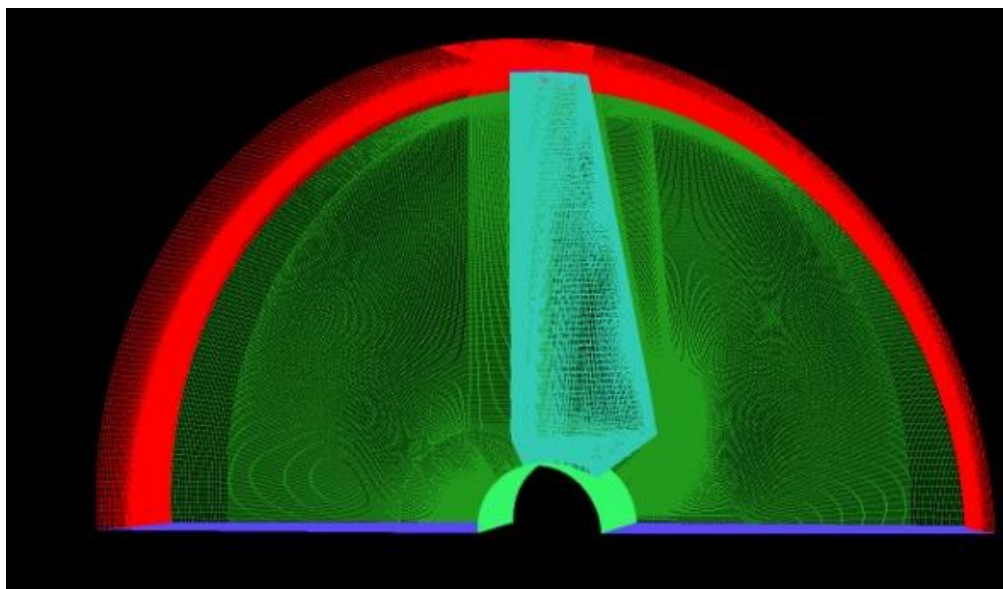


Рисунок 3.1 Вращающаяся часть расчетной сетки

Расчет производился на трехуровневых вложенных сетках. Самая подробная расчетная сетка с кольцом содержит 40 млн узлов, средняя - 5 млн. узлов, грубая - 600 тыс. узлов, самая подробная расчетная сетка без кольца - 50 млн. узлов, средняя - 6 млн. узлов, грубая - 800 тыс. узлов.

Основной сложностью построения расчетной сетки является малое расстояние между кольцом и лопастью винта. Для улучшения расчета характеристик в этой области построена дополнительная поверхность, на которой ставится граничное условие Connect. На втором этапе

необходимо поставить граничные условия. В рамках решения поставленной задачи поставлены следующие граничные условия:

Название	Описание	Поверхности, на которых поставлено ГУ
Wall	Условие непротекания	Поверхность вала
Solid Insulated	Интегрируемое условие прилипания	Лопасть винта
Wall Insulated	Не интегрируемое условие прилипания	Поверхность кольца
Connect	Стыковка несогласованных блоков сетки	Стыковка вращающейся и стационарной областей
Symmetry polar	Периодичность	Боковые грани расчетного сектора

4. Результаты

Расчет коэффициентов тяги и мощности ВВ производился на расчетной сетке средней мощности с 6 млн. узлов. Графики зависимости коэффициентов тяги и мощности представлены на рисунках 4.1 и 4.2, соответственно.

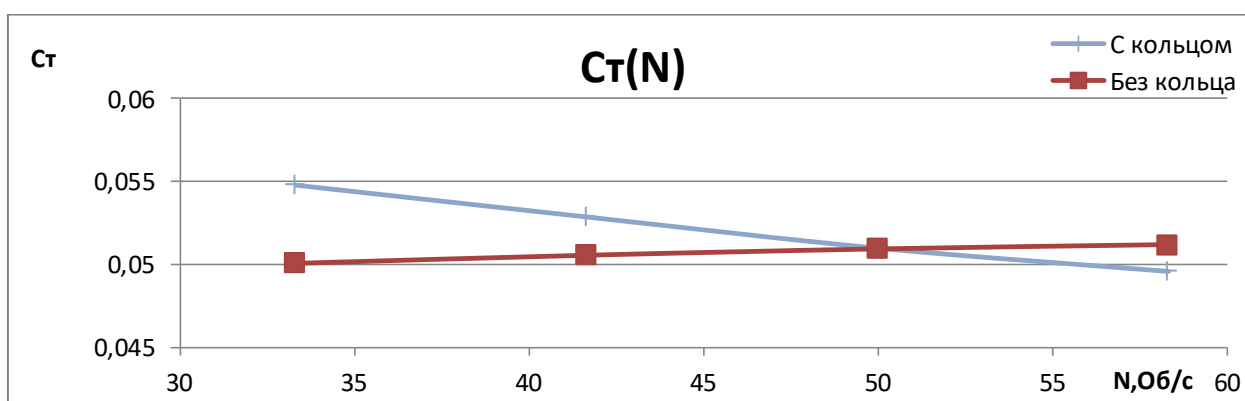


Рисунок 4.1 График зависимости коэффициента тяги ВВ от количества оборотов

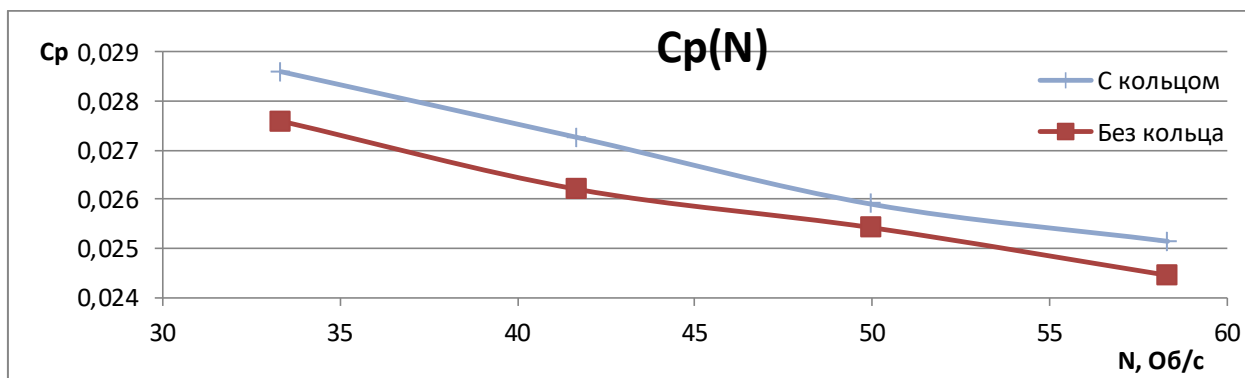


Рисунок 4.2 График зависимости коэффициента мощности ВВ от количества оборотов

Проанализировав поведение графиков, можно сказать, что при увеличении оборотов воздушного винта с кольцом тяга уменьшается, а тяга ВВ без кольца - увеличивается. Таким образом, с точки зрения аэродинамики целесообразность использования кольца на винте зависит от рабочего режима винта. На режимах с числом оборотов винта более чем 3000 об/мин использование кольца вызывает потерю тяги. Мощность воздушного винта, как с кольцом так и без него, ведет себя одинаково и уменьшается с увеличением числа оборотов ВВ. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными по теории идеального пропеллера.

Литература

1. *Остроухов С.П.* Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей, Москва, ФизМатЛит, 2014.
2. *Босняков С.М.* Концепция программного продукта EWT-ЦАГИ и основные этапы её развития // Труды ЦАГИ – №2671, Москва 2007.
3. *Кажан Е.В.* Повышение устойчивости явной схемы Годунова–Колгана–Родионова локальным введением неявного сглаживателя // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII, № 6. С. 66–84.
4. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. -М.: Наука, 1976.
5. *Колган В.П.* Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Ученые записки ЦАГИ. 1972. т. 3, № 6, , с. 68-77.
6. *Родионов А.В.* Монотонная схема второго порядка аппроксимации для маршевых расчетов неравновесных потоков // ЖВМ и МФ. 1987. т. 27, № 4.
- 7.