

УДК 629.735.45.015.3.035.62

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДИНОЧНОЙ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА В ПАКЕТАХ FLOEFD, ANSYS FLUENT И RC-VTOL

**Б.С. КРИЦКИЙ, М.С. МАХНЁВ, Р.М. МИРГАЗОВ,  
П.Н. СУББОТИНА, Т.В. ТРЕБУНСКИХ**

В работе представлены результаты численного моделирования обтекания одиночной лопасти несущего винта. Расчеты проводились в универсальном пакете CFD (Calculation Fluid Dynamic) моделирования FloEFD, основанном на решении системы осредненных уравнений Навье-Стокса, а также в программном комплексе RC-VTOL, использующем вихревые методы. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными и результатами моделирования в программном пакете ANSYS Fluent (лицензия ЦАГИ №501024). Показано удовлетворительное, а в некоторых случаях и хорошее согласование расчетных данных, полученных по разным методикам, с экспериментальными.

**Ключевые слова:** CFD, вихревые методы, осредненные уравнения Навье-Стокса, несущий винт.

### ВВЕДЕНИЕ

Внешняя аэродинамика лежит в основе проектирования современных летательных аппаратов. Понимание процесса обтекания тел позволяет значительно улучшить аэродинамические характеристики аппарата, а также определить силы и моменты, действующие на элементы конструкции.

При проектировании вертолетов важной задачей являются исследования аэродинамических характеристик несущего винта, а также его влияние на остальные элементы летательного аппарата во всем диапазоне условий его работы.

Цель данной работы заключается в валидации интегрированного в CAD (Computer-Aided Design) полнофункционального CFD (Calculation Fluid Dynamic) пакета FloEFD на примере задачи моделирования обтекания одиночной лопасти несущего винта и исследовании возможности применения рассматриваемого подхода для более сложных задач, включающих взаимодействие различных элементов летательного аппарата. FloEFD объединяет в себе все шаги моделирования – начиная с использования трехмерных CAD моделей и заканчивая генерацией сетки, вычислением и визуализацией результатов.

Результаты расчетов на FloEFD сравниваются с результатами расчета на коммерческом пакете ANSYS Fluent и в программном комплексе RC-VTOL V1.0, разработанном в НИО-5 ЦАГИ. Методика расчета в RC-VTOL, в отличие от других вычислительных пакетов, основана на нелинейной вихревой теории в нестационарной постановке [1, 2]. Показаны основы, преимущества и ограничения того или иного программного комплекса. Сделаны соответствующие выводы о возможности их применения в зависимости от поставленной задачи.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Результаты моделирования в пакете FloEFD сравниваются с экспериментальными данными, полученными Л.С. Павловым в 1979 г. [3], с результатами численного моделирования в пакете ANSYS Fluent и в специализированном программном продукте, разработанном в ЦАГИ.

В качестве объекта исследования рассматривалась одиночная лопасть несущего винта с профилем NACA0012, имеющая прямоугольную форму в плане, без крутки, жесткая на изгиб и кручение. Также в модели учитывалась заключенная в обтекатель втулка, через которую лопасть крепилась к вращающемуся валу, и балансировочный груз (рис. 1). Геометрические пара-

метры модели представлены в табл. 1. Лопасть была дренирована для измерений распределения давления по ее поверхности. Дренажные отверстия расположены в сечениях по относительному радиусу лопасти:  $\bar{r} = (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 0,99)$ .

Таблица 1

Геометрические параметры модели

Радиус модели	$R=1,2$ м
Хорда лопасти	$b=0,15$ м
Угол установки лопасти	$\varphi=8^\circ$
Угловая скорость вращения	$\omega=36,5$ рад/с

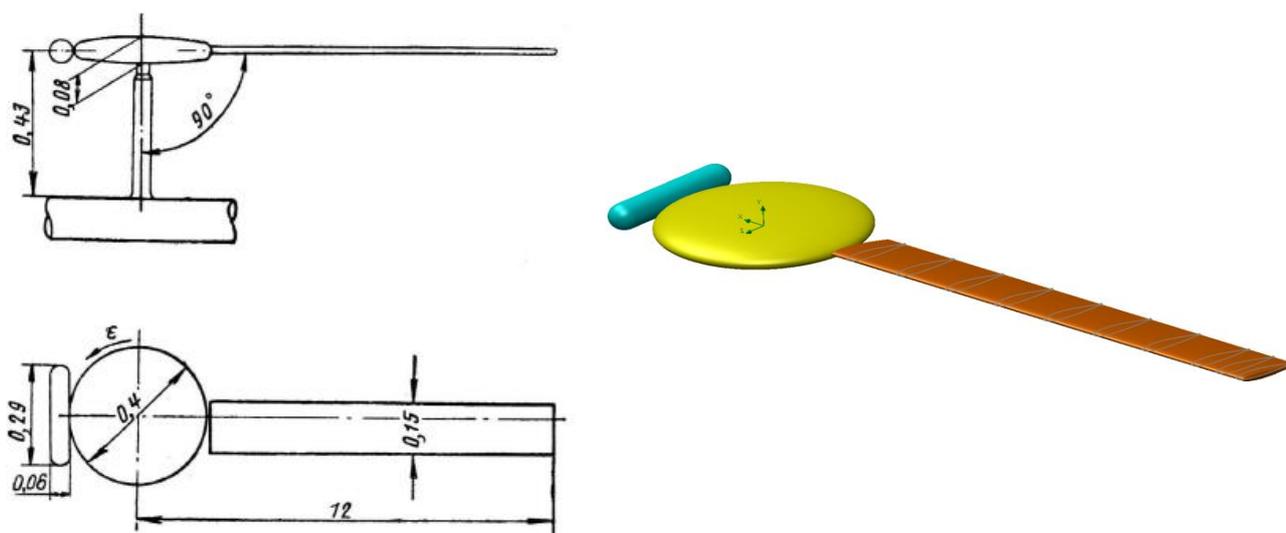


Рис. 1. Модель лопасти

Расчет проводился для следующих режимов набегающего потока: висение ( $V_\infty = 0$ ) и ступательный полет ( $V_\infty = 11,5$  м/с). Температура окружающей среды равна  $15^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении 101325 Па. Лопасть вращается с угловой скоростью 36,5 рад/с. Все перечисленные условия и экспериментальные результаты взяты из работы Л.С. Павлова, проводившейся в аэродинамической трубе (АДТ) Т-105 ЦАГИ [3].

При решении данной задачи с использованием FloEFD во вращающейся области строилась равномерная сетка с разряжением по главным осям координат при удалении от винта. Затем задавались две дополнительные локальные сетки вокруг лопасти и на ее поверхности для того, чтобы разрешить законцовку и переднюю кромку лопасти. Общее количество элементов сетки составило 2 700 000 ячеек (рис. 2) и ее построение заняло около 5 минут. В традиционном пакете CFD использовалась тетрагональная сетка, состоящая из 8 500 000 ячеек (рис. 3).

Расчеты в пакете FloEFD проводились в нестационарной постановке в три этапа с разными шагами по времени, изменявшимися от значения, соответствующего изменению азимутального угла на  $9^\circ$  за одну итерацию, до значения, соответствующего изменению азимутального угла на  $1^\circ$ , которое использовалось при расчете последнего оборота, предназначенного для снятия результатов. Расчет на персональной ЭВМ с характеристиками: процессор Intel Xeon 2,7 ГГц, 8 ядер, 32 Гб оперативной памяти занял 36 часов, а вся подготовка к расчету заняла менее 30 минут.

Для расчета с использованием пакета ANSYS Fluent применялся кластер, состоящий из 24 машин мощностью Intel Xeon 2,8 ГГц, 12 ядер, 100 Гб оперативной памяти (общее число

процессоров 288). Время расчета одного режима – 48 часов, а время, затраченное на построение сетки и модели, составило около 7 дней.

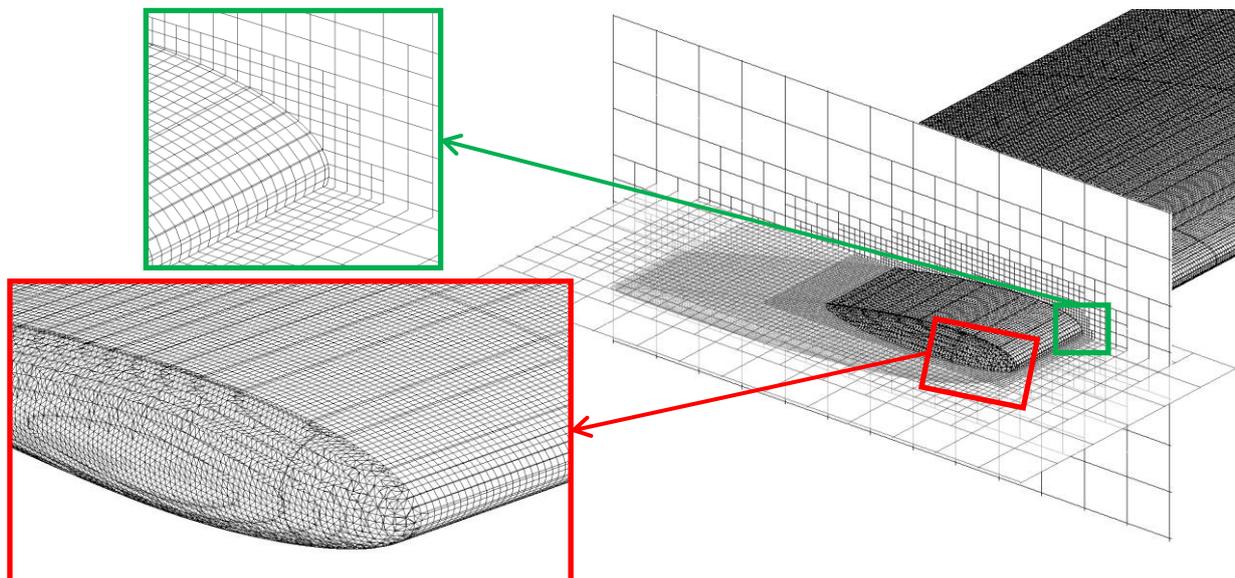


Рис. 2. Сеточная модель винта в FloEFD

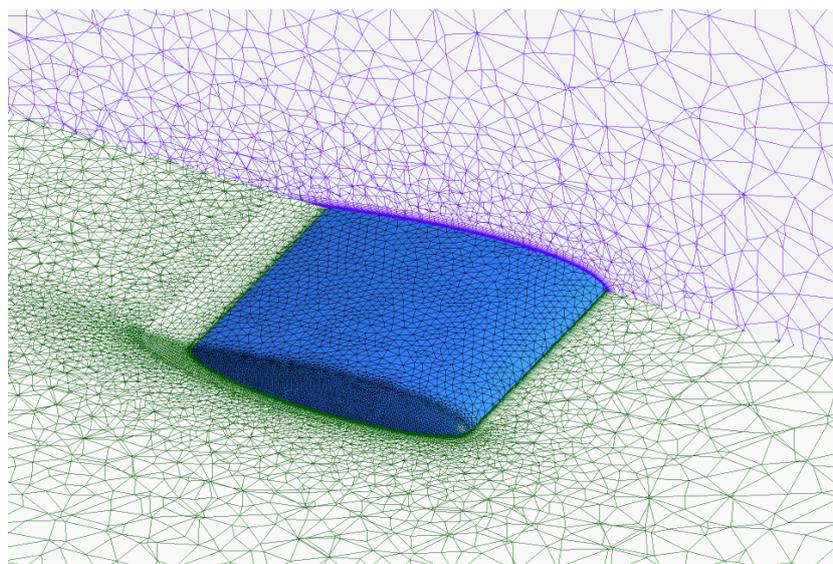


Рис. 3. Тетрагональная сетка в традиционном пакете CFD (ANSYS Fluent)

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

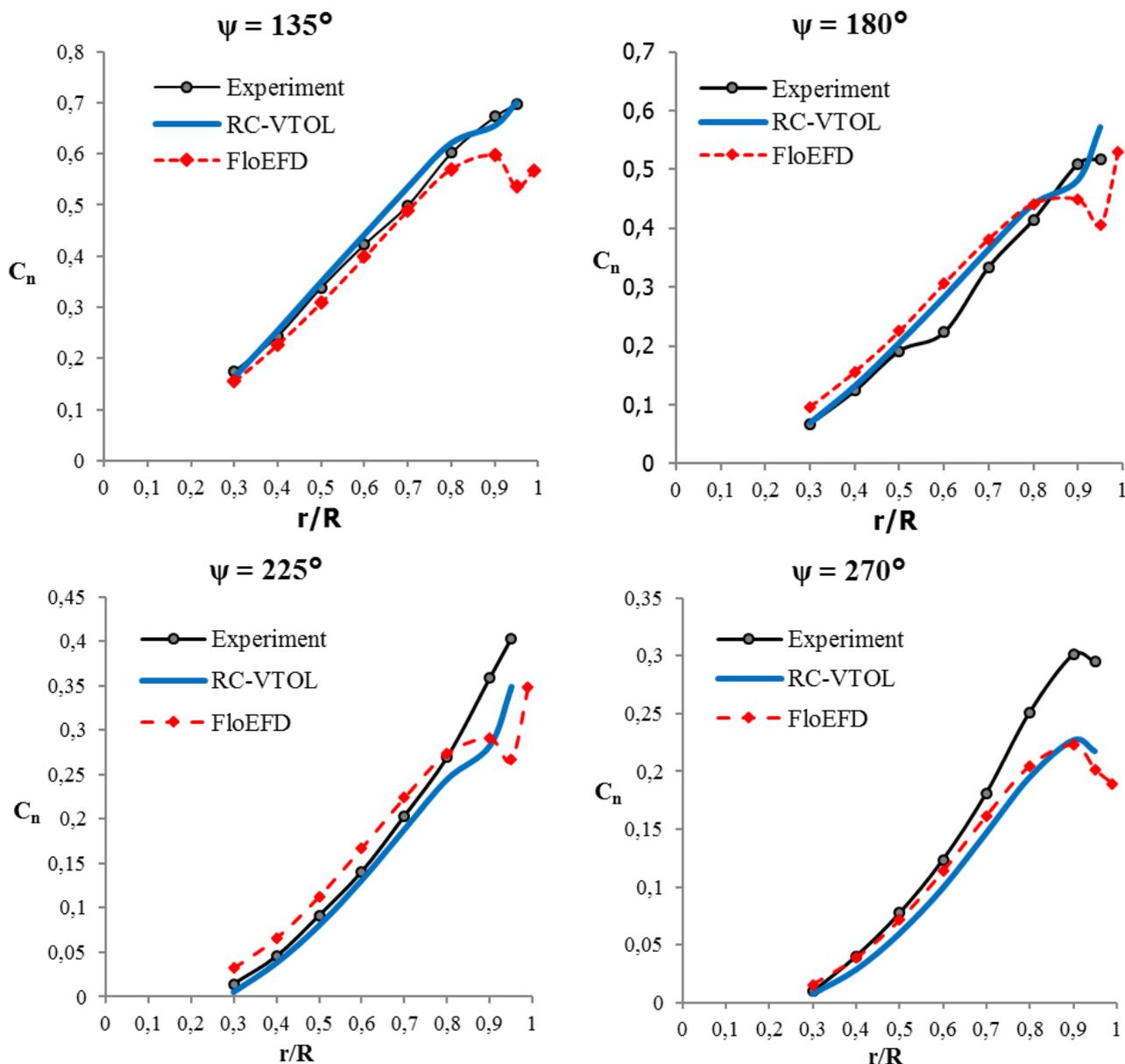
Также было проведено моделирование в специализированном программном комплексе RC-VTOL, созданном в ЦАГИ на базе нелинейной вихревой теории винта (разработанная коллективом ученых школы С.М. Белоцерковского) [1, 2]. Расчеты проводились на персональной ЭВМ с характеристиками: процессор Intel 3 ГГц, 4 ядра, 8 Гб оперативной памяти, а среднее время расчета одного режима составило около 20 минут.

Структура вихревого следа, по результатам расчетов FloEFD (слева) и RC-VTOL (справа) показана на рис. 4.

Распределения расчетных коэффициентов давления ( $C_p$ ) на относительном радиусе  $\bar{r} = 0,8$  демонстрируют хорошее согласование как с результатами моделирования в традиционном пакете CFD, так и с экспериментальными результатами (рис. 5).



На рис. 6 приведено распределение коэффициента нормальной силы сечения лопасти вдоль ее радиуса, полученное в результате расчетов с использованием FloEFD и RC-VTOL и в результате экспериментов в АДТ. Также можно отметить хорошее согласование численного моделирования с экспериментом.



**Рис. 6.** Распределение коэффициента нормальной силы сечения лопасти вдоль ее радиуса при скорости набегающего потока 11,5 м/с

Данное исследование демонстрирует, что все программные продукты успешно справились с определением аэродинамических характеристик лопасти. При этом пакет RC-VTOL оказался наименее требовательным к вычислительным ресурсам, но в отличие от других пакетов не дает возможности получать распределение давления по поверхностям. Стоит отметить, что пакет FloEFD менее ресурсоемкий, чем пакет, использующий традиционный подход CFD: на задание расчетного варианта потребовалось около 30 минут, включая построение сетки, причем сама расчетная сетка, позволяющая получить достаточно точные результаты, была в 3 раза меньше, чем использовавшаяся в расчетах с традиционным подходом CFD.

## ВЫВОДЫ

Сравнение результатов, полученных в программных комплексах FloEFD, ANSYS Fluent и RC-VTOL, показывает удовлетворительное, а на некоторых режимах хорошее согласование с экспериментом.

В отличие от традиционного CFD пакета ANSYS Fluent, полностью интегрированный в CAD пакет FloEFD, позволил подготовить модель к расчету, включая построение сетки, в краткие сроки (порядка 30 минут). Приемлемые результаты с помощью FloEFD были получены за 36 часов на 8 ядрах для одного режима, в то время как в ANSYS Fluent этот расчет занял 48 часов на 288 ядрах. При этом в FloEFD использовалась сетка в 3 раза меньшая, чем в расчетах ANSYS Fluent.

Программный комплекс RC-VTOL дает приемлемые результаты за короткое время в отличие от CFD пакетов, менее требователен к вычислительным ресурсам, однако в отличие от других пакетов не дает возможности получать распределение давления по поверхностям, а дает только перепад давления.

Реализация технологии скользящих сеток для моделирования вращения позволила FloEFD погрузиться в решение сложных проблем в области аэродинамики, таких как моделирование несущего винта вертолета, и совместно с ЦАГИ выполнить валидацию обтекания одиночной лопасти винта. Новая технология, расширяющая возможности для моделирования вращения в таких устройствах, как насосы, вентиляторы и воздуходувки, стала доступна в версии FloEFD™ V14.0. Использование скользящих сеток позволяет раздвинуть границы моделирования турбомашин в области, где течения в окрестности вращающихся деталей сильно неоднородны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский С.М., Локтев Б.Е., Ништ М.И. Исследование на ЭВМ аэродинамических и аэроупругих характеристик несущего винта. – М.: Машиностроение. 1992. – 218 с.
2. Крицкий Б.С. Математическая модель аэродинамики винтокрылого летательного аппарата // Труды ЦАГИ. 2002. Вып. № 2655. С. 50 – 56.
3. Павлов Л.С. Распределение давления в сечениях прямоугольного крыла (лопасти) при криволинейном движении в несжимаемой среде // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т. X. № 2. С. 104 – 108.

## AERODYNAMIC CHARACTERISTICS CALCULATION ON SINGLE ROTOR BLADE USING FLOEFD, ANSYS FLUENT AND RC-VTOL

**Kritskiy B.S., Makhnev M.S., Mirgazov R.M.,  
Subbotina P.N., Trebunskikh T.V.**

The results of computational simulation of helicopter rotor's single blade flow, for which experimental (model test) data are published, are represented in this article. The calculations were made in the universal software package of CFD modeling FloEFD, which was based on the solution of averaged equations' system of Navier-Stokes, as well as in the program software RC-VTOL using the vortex method. The obtained results are compared with experimental data and modeling results in the program software ANSYS Fluent (license of TsAGI Nr. 501024). The work shows satisfactory, and in some cases good calculation data reconciliation getting with different techniques including experimental.

**Key words:** CFD, vortex methods, averaged Navier-Stokes equations, the main rotor.

## REFERENCES

1. **Belocerkovskiy S.M., Loktev B.E., Nisht M.I.** Issledovanie na EhVM aehrodinamicheskikh i aehrouprugikh kharakteristik nesuthego vinta [Research on the computer the aerodynamic and aeroelastic characteristics of main rotor] Moscow. Mashinostroenie. 1992. 218 p. (In Russian)
2. **Krickiy B.S.** Matematicheskaya modelj aehrodinamiki vintokrihlogo letateljnogo apparata. Trudih CAGI [Mathematical model of rotorcraft aerodynamics. Proceedings of CAHI] Moscow. 2002. Iss. № 2655. PP. 50 – 56. (In Russian)
3. **Pavlov L.S.** Raspredelenie davleniya v secheniyakh pryamougoljnogo krihla (lopasti) pri krivolineynom dvizheniem v neszhimaemoj srede. Ucheniye zapiski CAGI [The pressure distribution in sections of rectangular wing (blades) in the curvilinear motion in an incompressible medium. Scientific Notes CAHI] Moscow. 1979. V. X. № 2. PP. 104 – 108. (In Russian)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Крицкий Борис Сергеевич**, 1949 г.р., окончил ВВИА им. Н.Е. Жуковского (1976), доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, автор более 170 научных работ, область научных интересов – численные методы в аэрогидродинамике, аэродинамика и аэроакустика винтокрылых летательных аппаратов, электронный адрес: boris.kritsky@tsagi.ru.

**Махнёв Мирослав Сергеевич**, 1988 г.р., окончил КГТУ "КАИ" (2012), аспирант, инженер ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, автор 10 научных работ, область научных интересов – аэродинамика, вычислительные методы, электронный адрес: kleonorm@mail.ru.

**Миргазов Руслан Миннхатович**, 1979 г.р., окончил МФТИ (2002), кандидат технических наук, начальник сектора в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, автор более 30 научных работ, область научных интересов – численные методы и их алгоритмическая реализация, аэродинамика и акустика несущего винта, электронный адрес: ruslan.mirgazov@tsagi.ru.

**Субботина Полина Николаевна**, окончила СПбГТУ (2000), магистр, начальник группы инженерного моделирования в Ментор Графикс Девелопмент Сервисез Лимитед, автор 5 научных работ, область научных интересов – вычислительная гидроаэродинамика, электронный адрес: Polina Subbotina@mentor.com.

**Требунских Татьяна Валерьевна**, окончила ВГУ (2003), руководитель проектов в Ментор Графикс Девелопмент Сервисез Лимитед, автор 9 научных работ, область научных интересов – вычислительная гидрогазодинамика, теплообмен, электронный адрес: Tatiana Trebunskikh@mentor.com.