

Численное моделирование несущего винта квадрокоптерной системы на режиме авторотации

Бритов А.Д.

МГТУ им.Н.Э.Баумана,

кафедра Специального машиностроения СМЗ-113,

2022 год

Оглавление

1. Введение	3
2. Авторотация	5
3. Численная модель в ПК FlowVision	9
3.1 Физические основы	9
3.2 Численный алгоритм	Ошибка! Закладка не определена.
4. Постановка валидационной задачи	10
5. Результаты моделирования валидационной задачи	13
6. Постановка задачи моделирования несущего винта на режиме авторотации	18
7. Результаты моделирования несущего винта на режиме авторотации	20
8. Выводы	22
9. Список литературы	23

1. Введение

Проектируемый МСА относится к области аэрокосмической техники и может быть использован при создании возвращаемых с орбиты автономных автоматических капсул многократного применения. Предлагаемое решение может найти применение при оперативной доставке (с помощью авиационных средств) полезных грузов различного целевого назначения в труднодоступные районы (или регионы) с надежным обеспечением их целостности и сохранности, а также сбора метеоданных.

Одними из наиболее остро стоящих задач при проектировании такого рода аппарата, являются формирование облика и разработка системы, позволяющей на дозвуковом участке траектории обеспечить достаточное торможение, а также приемлемую точность управления.

Перспективным направлением, включающим в себя решение обеих вышеуказанных задач, является использование квадрокоптерной системы. С одной стороны, четыре несущих винта с переменным шагом способны затормозить аппарат на этапе спуска с помощью эффекта авторотации. С другой стороны, когда аппарат достаточно заторможен, система управления сможет обеспечить достаточную точность посадки доставляемого груза.

Важнейшим этапом расчета работы несущего винта на режиме авторотации является определение угловой скорости вращения, до которой набегающий воздушный поток может его раскрутить.

Авторотация – режим полета, при котором энергия для вращения несущего винта не потребляется. Мощность для создания силы тяги и вращения винта обеспечивается за счет снижения высоты ЛА. Источником мощности, в данном случае, является потенциальная энергия всего аппарата. Конкретно энергию несущему винту сообщает относительный поток воздуха через диск винта, направленный при снижении вверх.

Для вертолётов в отечественной практике для обозначения авторотации несущего винта установился термин «самовращение несущего винта» (СНВ). При штатном полёте вертолётa, с включённым двигателем, воздушный поток поступает сверху и выходит снизу — несущий винт работает в режиме «пропеллер». В режиме СНВ несущий винт вертолётa раскручивается от встречного набегающего потока, одновременно создавая подъёмную силу. Авторотация возможна потому, что несущий винт оказывается при таком обтекании в режиме «ветряка».

Моделирование обтекания и расчет интегральных аэродинамических характеристик будут осуществляться на основе коммерческого ПК FlowVision. Полученная скорость, затем, будет использоваться в свободном программном обеспечении OpenFoam, где будет производится расчет полной модели МСА.

2. Авторотация

Авторотация – режим полета, при котором энергия для вращения несущего винта не потребляется. Мощность для создания силы тяги и вращения винта обеспечивается за счет снижения высоты ЛА. Источником мощности, в данном случае, является потенциальная энергия всего аппарата. Конкретно энергию несущему винту сообщает относительный поток воздуха через диск винта, направленный при снижении вверх.

Хотя наименьшая скорость снижения достигается при полете вперед, несущий винт обеспечивает безмоторное снижение и по вертикали.

При безмоторном вертикальном снижении несущий винт весьма эффективно создает силу тяги, поддерживающую аппарат. Винт действует в общем как парашют того же диаметра. Скорость вертикального снижения на авторотации велика по той причине, что соответствующий парашют для такого веса слишком мал. Картина течения вокруг винта при авторотации сходна с картиной потока вокруг плохо обтекаемого тела того же размера, поэтому нет ничего удивительного в том, что и силы их сопротивления примерно одинаковы. Так как эффективность несущего винта при таких условиях близка к максимально возможной, малую скорость снижения можно обеспечить только посредством малой нагрузки на диск. При проектировании ЛА, имеющего винт, нагрузку на диск обычно выбирают, руководствуясь главным образом желанием получить высокие аэродинамические характеристики винта, а характеристики авторотации обычно рассчитывают, имея в виду возможность «подрыва» вблизи земли.

Рассмотрим теперь безмоторное снижение ЛА с точки зрения аэродинамической нагрузки лопастей. Скорость потока через диск, величину которой определяет коэффициент протекания $\lambda = \frac{V+v}{r\Omega}$, где V – скорость перемещения несущего винта относительно набегающего потока, v – индуктивная скорость в плоскости диска, r – радиус винта, Ω – угловая скорость

вращения винта, направлена вверх, так что вектор подъемной силы наклонен вперед (рис. 2.1).

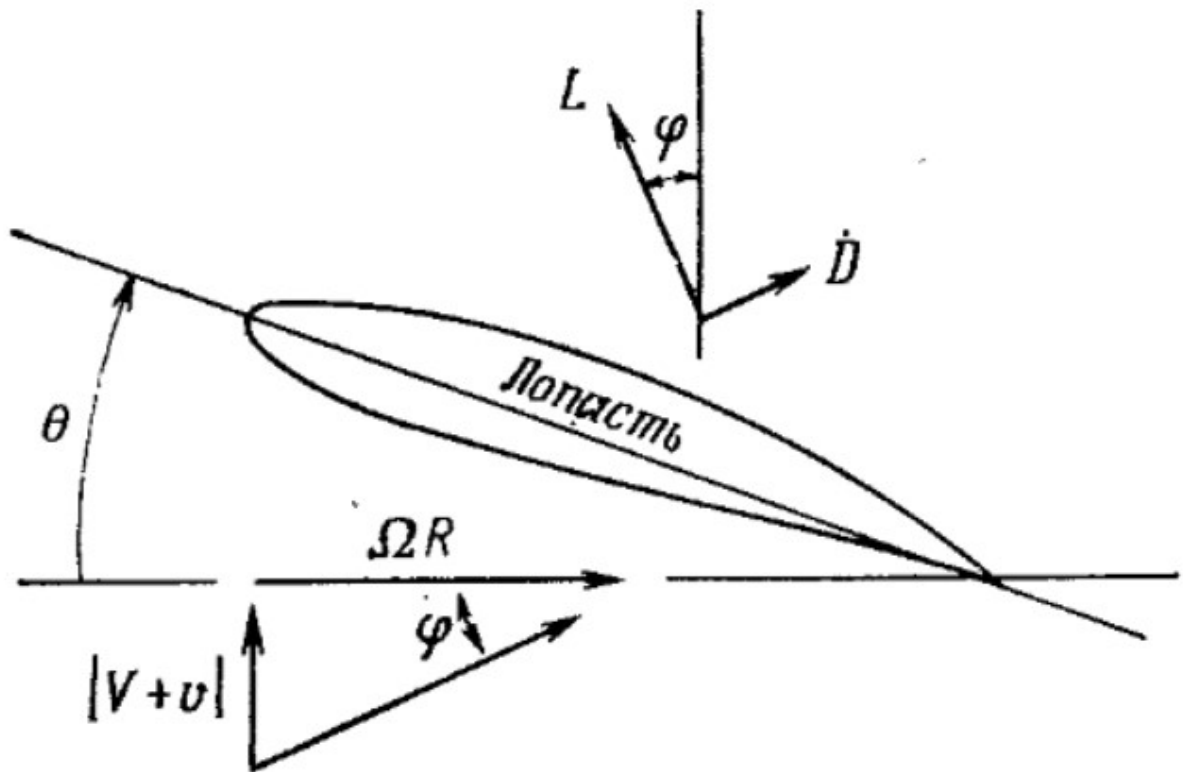


Рис.2.1 – Обтекание сечения лопасти при авторотации

На рис.2.1 введены следующие обозначения:

φ – угол притекания.

θ – угол установки лопасти;

L – подъемная сила в сечении лопасти;

D – сила лобового сопротивления сечения лопасти.

Чтобы сечение лопасти не потребляло и не производило мощность, сумма проекций на плоскость вращения всех сил, действующих на сечение, должно равняться нулю, т.е. должен быть равен нулю элементарный аэродинамический момент в этом сечении: $dQ = r(D - L\varphi)dr = 0$. Но авторотацию создают индуктивная и профильная составляющие аэродинамического момента всего несущего

винта. Поэтому, вообще говоря, энергетически нейтральным оказывается только одно сечение, а остальные либо потребляют, либо производят мощность. Так как $\varphi = \arctg \left| \frac{V+v}{r\Omega} \right|$, угол притекания, большой в корневой части лопасти, уменьшается с приближением к ее концу. Следовательно, во внутренних сечениях лопасти $dQ < 0$, т.е. аэродинамический момент ускоряет вращение винта, причем энергия берется из воздушного потока. Во внешних же сечениях $dQ > 0$, аэродинамический момент тормозит винт, и энергия сообщается воздушному потоку. Так как суммарная мощность винта равна нулю, ускоряющий и тормозящий аэродинамические моменты должны взаимно уравновешиваться. При заданной скорости снижения концевая скорость $r\Omega$ винта сама изменяется до тех пор, пока не достигается такое равновесие. Рис.2.2 иллюстрирует работу сечений лопасти несущего винта при авторотации.

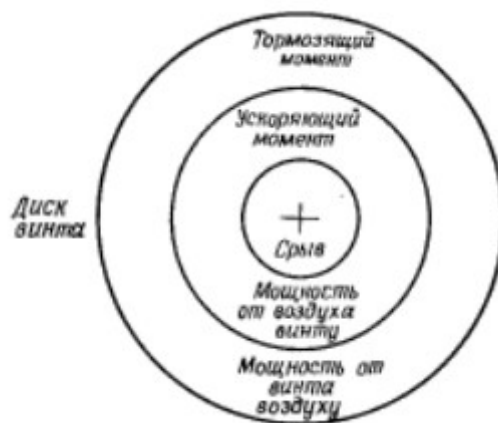


Рис.2.2 – Работа сечений лопасти несущего винта при авторотации

Если угловая скорость винта, соответствующая равновесию моментов, слегка уменьшается, то угол притекания φ возрастает во всех сечениях. При этом область ускоряющих моментов расширяется, захватывая внешние сечения, в результате чего суммарный аэродинамический момент винта становится ускоряющим. Этот момент вновь раскручивает винт до угловой скорости, соответствующей равновесию моментов. Таким образом, авторотация – устойчивый режим обтекания винта. Угол атаки $\alpha = \varphi + \theta$ увеличивается с приближением к корню лопасти, так как возрастает угол притекания. Поэтому

в корневой части лопасти на режиме авторотации возникает срыв. Отрицательная крутка, которую лопастям обычно придают для улучшения характеристик винта на висении и при полете вперед, еще более увеличивает углы атаки внутренних сечений. Следовательно, с точки зрения характеристик авторотации отрицательная крутка нежелательна. Однако наибольшую часть силы тяги несущего винта создают внешние части лопастей, где велики относительные скорости воздуха, так что срыв в корневых частях, как правило, не оказывает особо неблагоприятного влияния на характеристики авторотации.

На висении поток через диск направлен вниз, а при авторотации – вверх. Вследствие изменения направления потока при переходе от висения к авторотации, углы атаки сечений увеличиваются. Избыток тормозящего аэродинамического момента уменьшает угловую скорость винта. Кроме того, расширяется зона срыва, вследствие чего снижается подъемная сила лопасти и увеличивается ее сопротивление. Уменьшение подъемной силы требует увеличения ускоряющего момента, а рост сопротивления увеличивает тормозящий момент. Следовательно, авторотация винта с большой зоной срыва может оказаться невозможной. Чтобы избежать чрезмерного увеличения зоны срыва и снижения угловой скорости вращения винта, необходимо как можно быстрее уменьшить углы установки лопасти. Обычно оптимальным общим шагом для авторотации является малый положительный угол, при котором можно поддерживать нормальную величину частоты вращения винта. Если большой зоны срыва нет, то скорость снижения слабо зависит от общего шага и частоты вращения винта, так как профильная мощность мало меняется [1].

3. Численная модель в ПК FlowVision

3.1 Физические основы

Для расчета вращающихся тел в ПК FlowVision используются локальные вращающиеся системы координат (ЛВСК)[2].

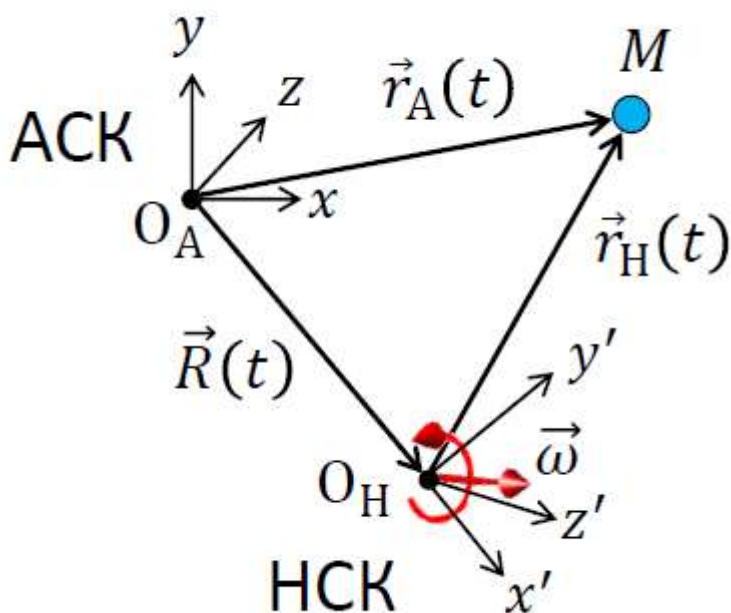


Рис.3.1 – Ускорение точки в произвольной СК

Ускорение в такой СК задается следующей формулой:

$$\vec{a}_A = -\omega^2 \vec{r}_H + 2\vec{\omega} \times \vec{v}_H + \vec{a}_H$$

Тогда сила, действующая на тело в неинерциальной системе координат, будет считаться как:

$$F_H = F_A + F_k + F_{ц}$$

Где F_k –Кориолисова сила, $F_{ц}$ –цетробежная сила, F_A –сила, действующая на тело в абсолютной СК.

Решаемые уравнения сохранения:

$$\operatorname{div}\vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho}\nabla P + 2\nu\nabla \cdot \hat{\tau}$$

$$\vec{F} = \rho\vec{g} - \rho(2\vec{\omega} \times \vec{V} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r})$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \rho\vec{F} \cdot \vec{V} + \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla H \right) + \nabla \cdot (2\eta\hat{\tau} \cdot \vec{V})$$

На скорость вращения тела влияют момент инерции и внешний момент сопротивления, которые задаются в качестве начальных условий:

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \int \frac{\vec{M}_{ext}}{I} dt + \int \frac{\vec{M}_{hydro}}{I} dt$$

4. Постановка валидационной задачи

Прежде, чем производить расчет винта на режиме авторотации, необходимо определить насколько хорошо ПК FlowVision способен решать задачи, связанные с моделированием работы несущих винтов.

В качестве валидационной задачи был взят винт из работы Карадонны – Танга [6]. Для воспроизведения условий, максимально приближенных к работе винтов МСА, была взята следующая расчетная конфигурация:

Таблица 4.1 – Параметры валидационного расчета

Длина хорды, м	0.1906
Радиус винта, м	1.143
Число Маха	0.439
Числе Рейнольдса	2.2e6
Скорость конца лопасти, м/с	172.245
Угол установки лопасти, град	8
Скорость вращения, об/мин	1250
Начальное давление, атм	1
Начальная температура, К	289.75
Начальная плотность, кг/м ³	1.2389

На рис.4.1 представлена геометрия исследуемого винта.

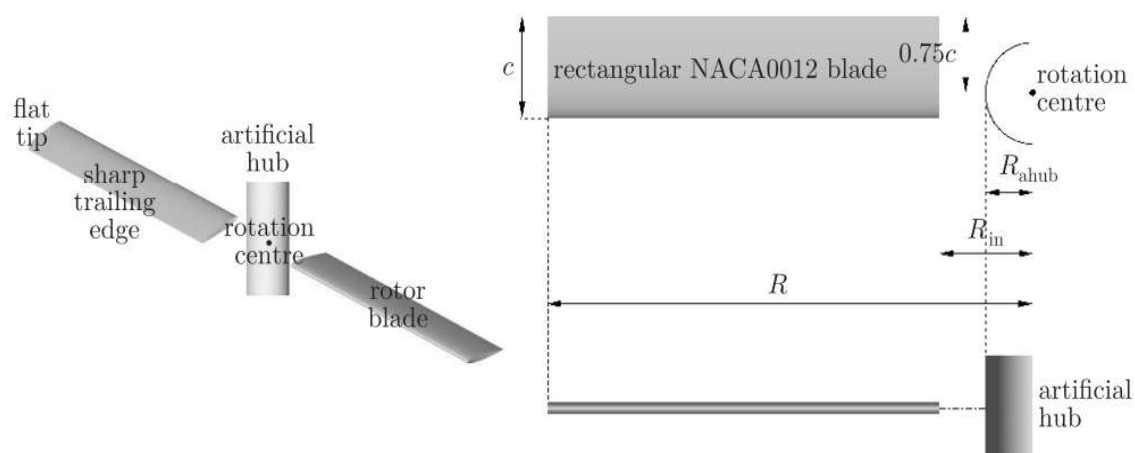


Рис.4.1 – Геометрия винта для валидационной задачи

Сравнение между экспериментальными и расчетными результатами проводилось по двум критериям: значение коэффициента тяги и распределение коэффициента давления по профилю лопасти на расстоянии $0.8R$ от центра винта (Рис.4.2).

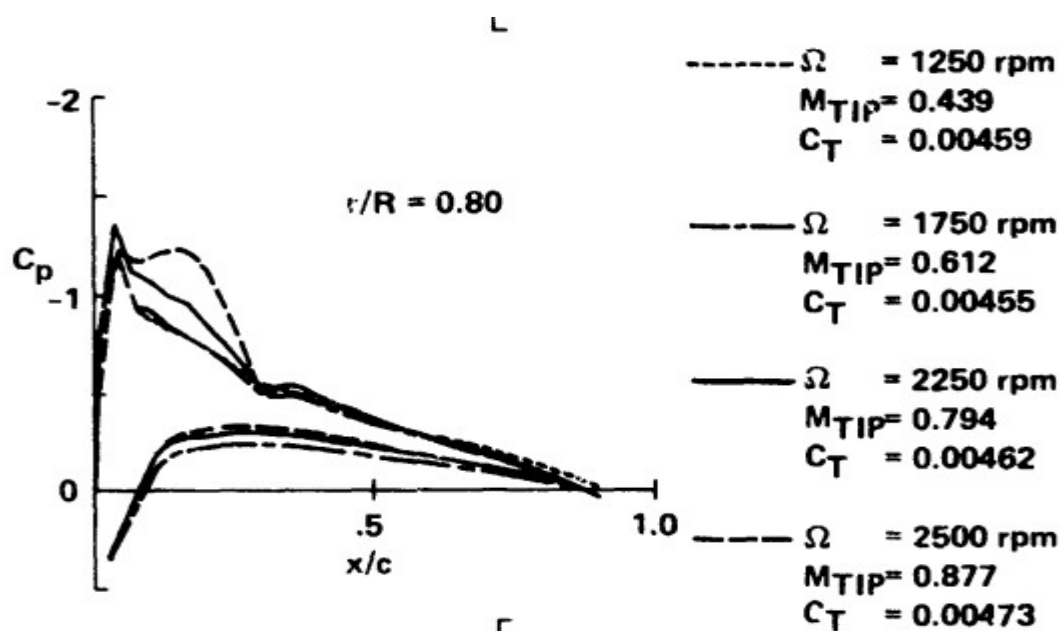


Рис.4.2 – Распределение коэффициента давления по профилю лопасти на расстоянии $0.8R$ от центра винта

Задача решается в секторной постановке с углом раскрытия сектора, равным 180 градусов. Для моделирования турбулентности используется модель Спаларта – Аллмараса.

5. Результаты моделирования валидационной задачи

На рис.5.1-5.3 представлены сечение расчетной сетки в области винта, поле скорости, которую генерирует винт, а также процесс сходимости расчета.

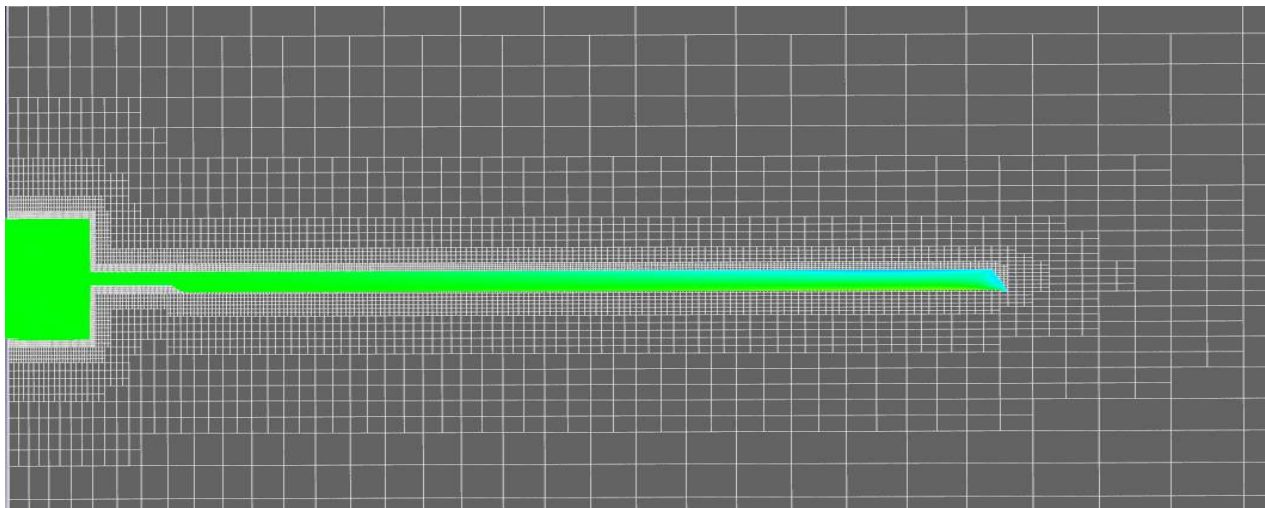


Рис.5.1 – Сечение расчетной сетки вблизи винта

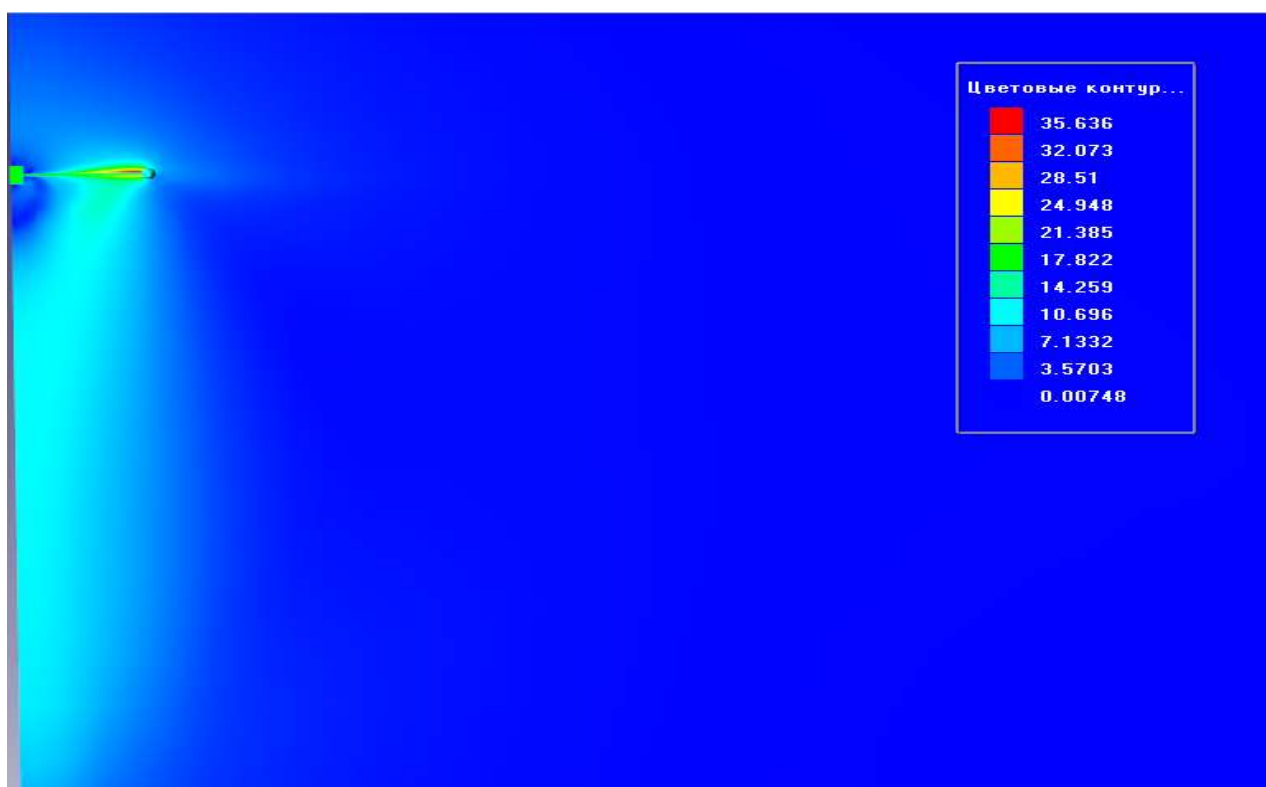


Рис.5.2 – Поле скорости

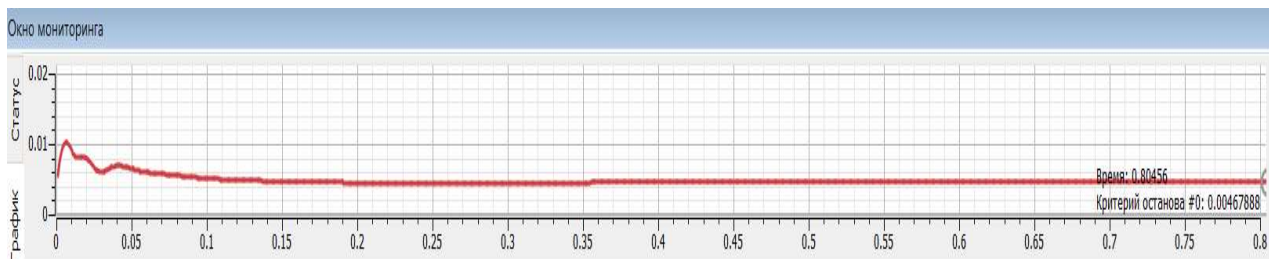


Рис.5.3 – Процесс сходимости коэффициента тяги

В результате моделирования был получен коэффициент тяги, равный $C_t = 0.00468$, что на 2% отличается от экспериментального значения.

На Рис.5.4 представлено сравнение распределения коэффициента давления по сечению лопасти, находящемуся на расстоянии $0.8R$ от центра винта.

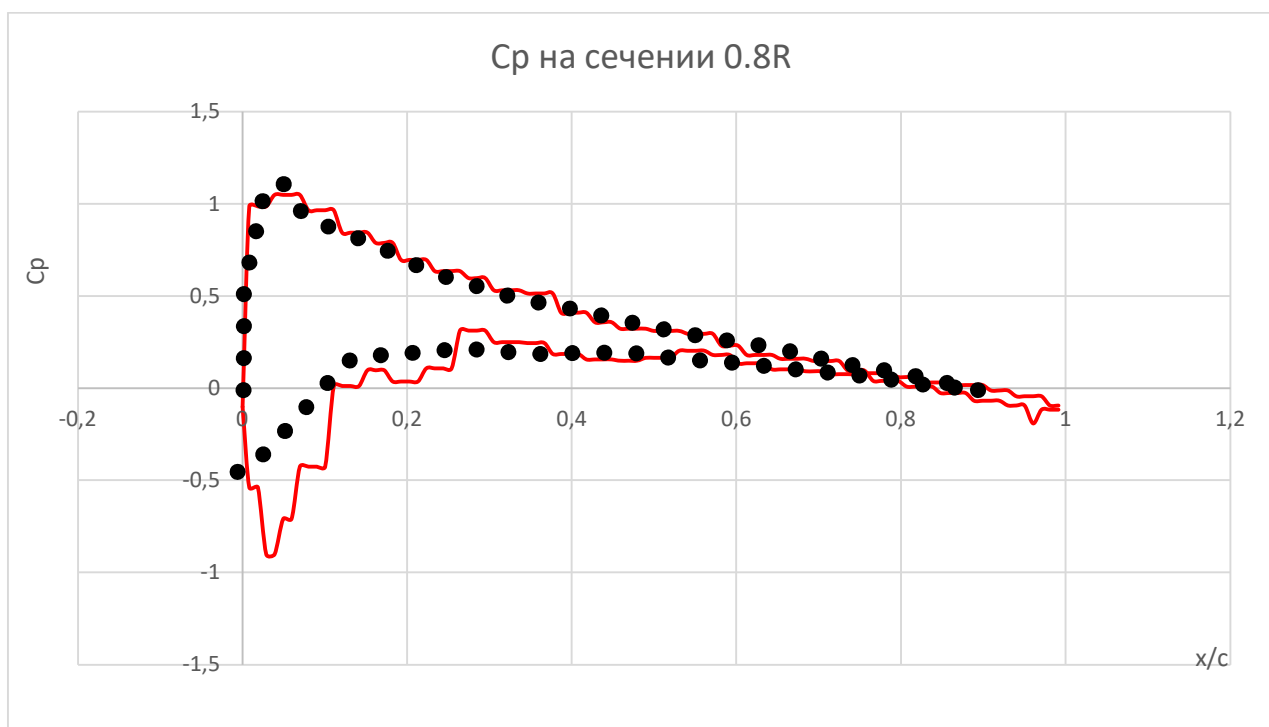


Рис.5.4 – Коэффициент давления на расстоянии $0.8R$ от центра винта

Необходимым этапом проведения инженерных расчетов в области вычислительной аэрогидродинамики является исследование сеточной сходимости. Сеточная сходимость - процесс поиска минимально необходимой расчетной сетки для получения качественного расчета в задаче (или классе задач). Критерием сходимости в рассматриваемой задаче является значение коэффициента тяги.

Для исследования сходимости по расчетной сетке в общей сложности было построено четыре расчетных сетки (Рис.5.5-5.8).

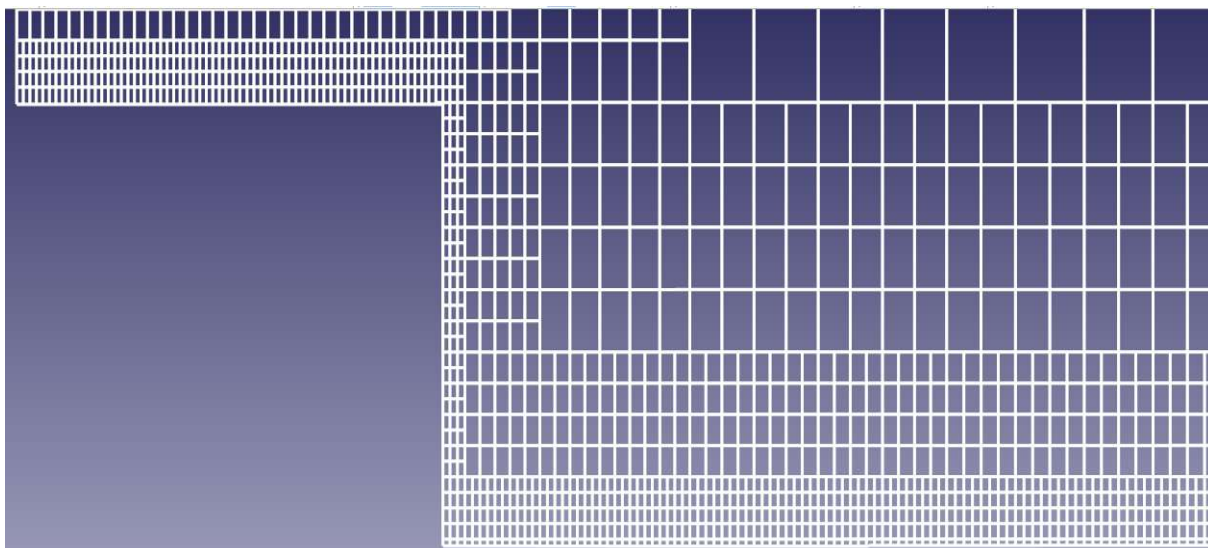


Рис.5.5 - Базовая сетка ($Y_{plus} = 382$, 14 ячеек на хорду)

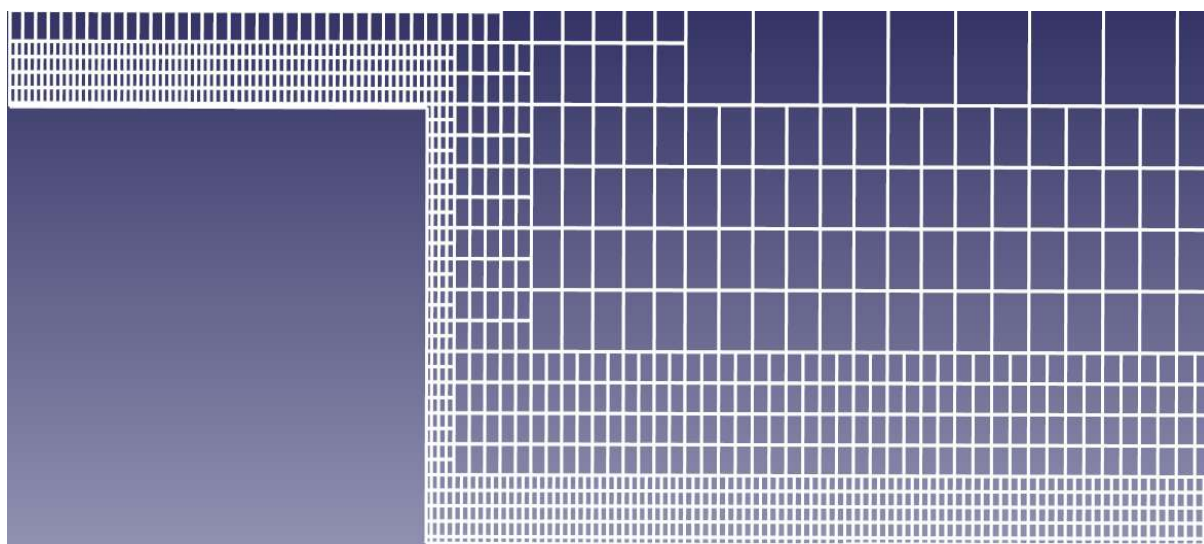


Рис.5.6 - Улучшенная сетка ($Y_{plus} = 380$, 14,5 ячеек на хорду)

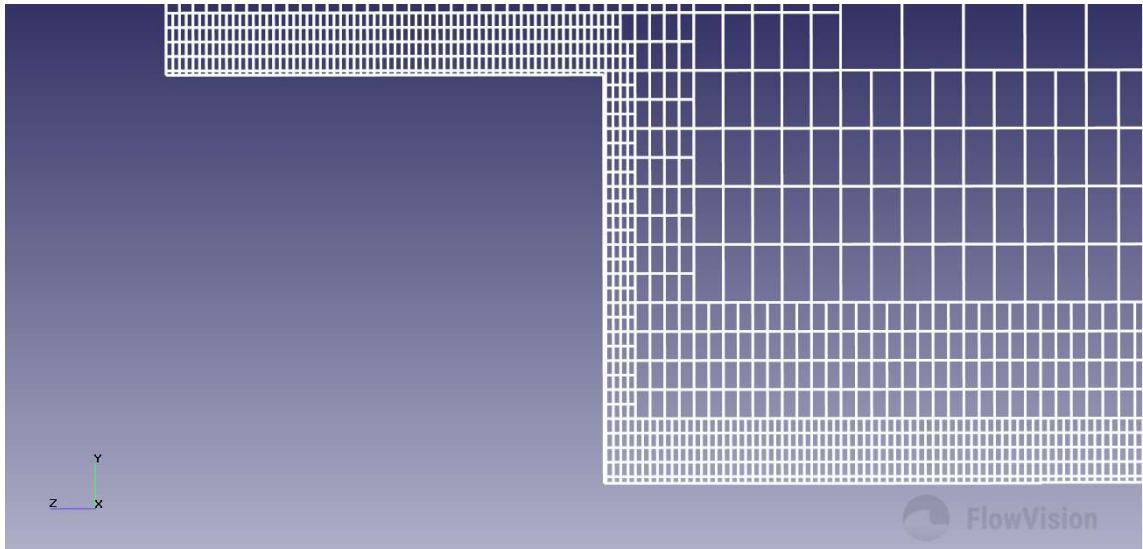


Рис.5.7 - Улучшенная сетка ($Y_{plus} = 378$, 15 ячеек на хорду)

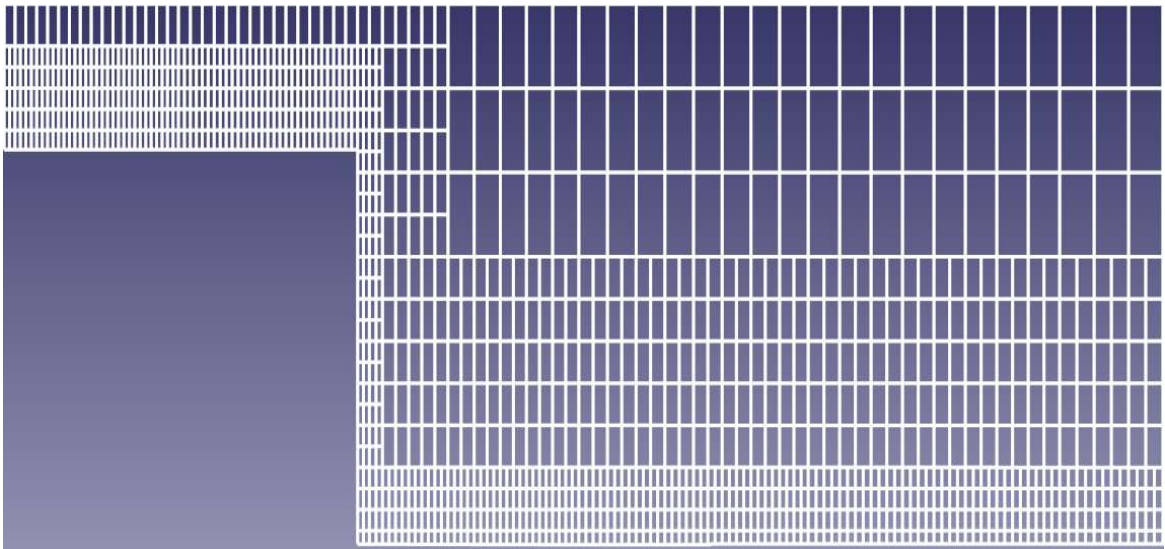


Рис.5.8 - Грубая сетка ($Y_{plus} = 550$, 10 ячеек на хорду)

На Рис.5.9 представлен результат исследования сеточной сходимости.

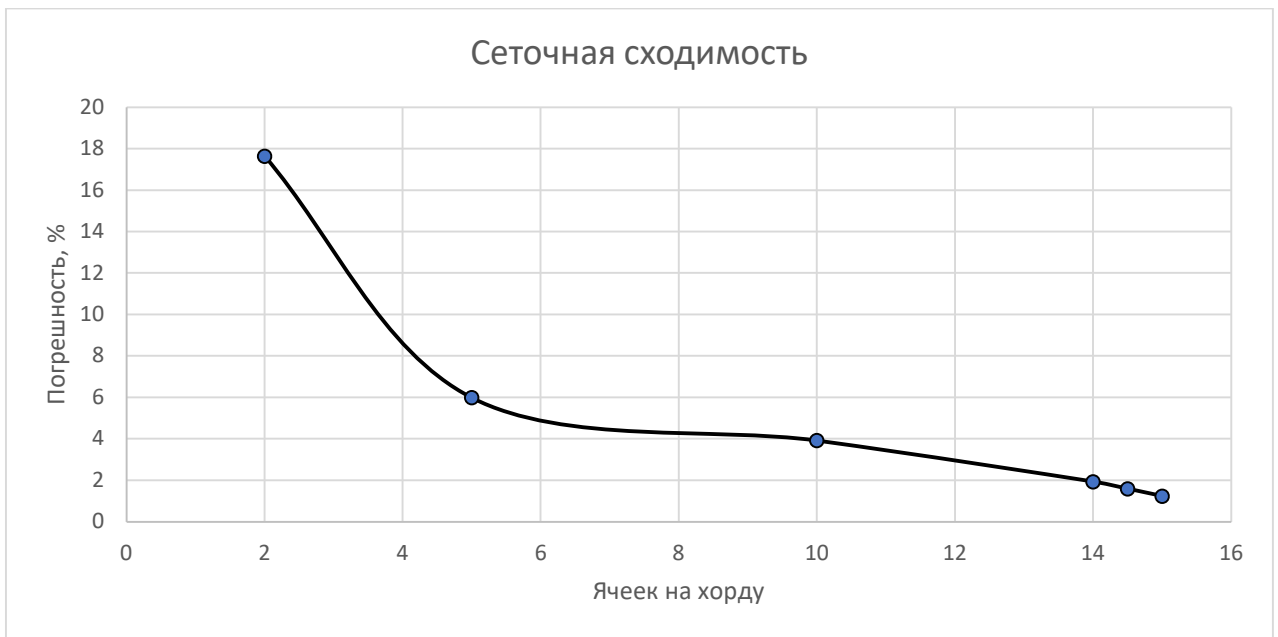


Рис.5.9 – Исследование сеточной сходимости

Как видно из графика, с увеличением сеточного разрешения погрешность определения коэффициента тяги винта уменьшается.

Проведенные исследования показывают, что ПК FlowVision прекрасно справляется с задачей моделирования работы несущего винта.

6. Постановка задачи моделирования несущего винта на режиме авторотации

Геометрия расчетной области представлена на Рис.6.1. Задача решается в сектор-слайдинговой постановке. Расчетная область разбивается на три сектора: верхний, средний и нижний. Средний сектор, содержащий трехмерную модель лопасти (Рис.6.2), сопрягается с верхним и нижним при помощи граничного условия «Скользкая поверхность». Скорость набегающего потока равна 55 м/с. Параметры атмосферы соответствуют высоте 5 км. Для моделирования турбулентности используется модель Спалларта – Аллмареса. Была построена расчетная сетка, состоящая из 250000 ячеек (Рис.6.3).

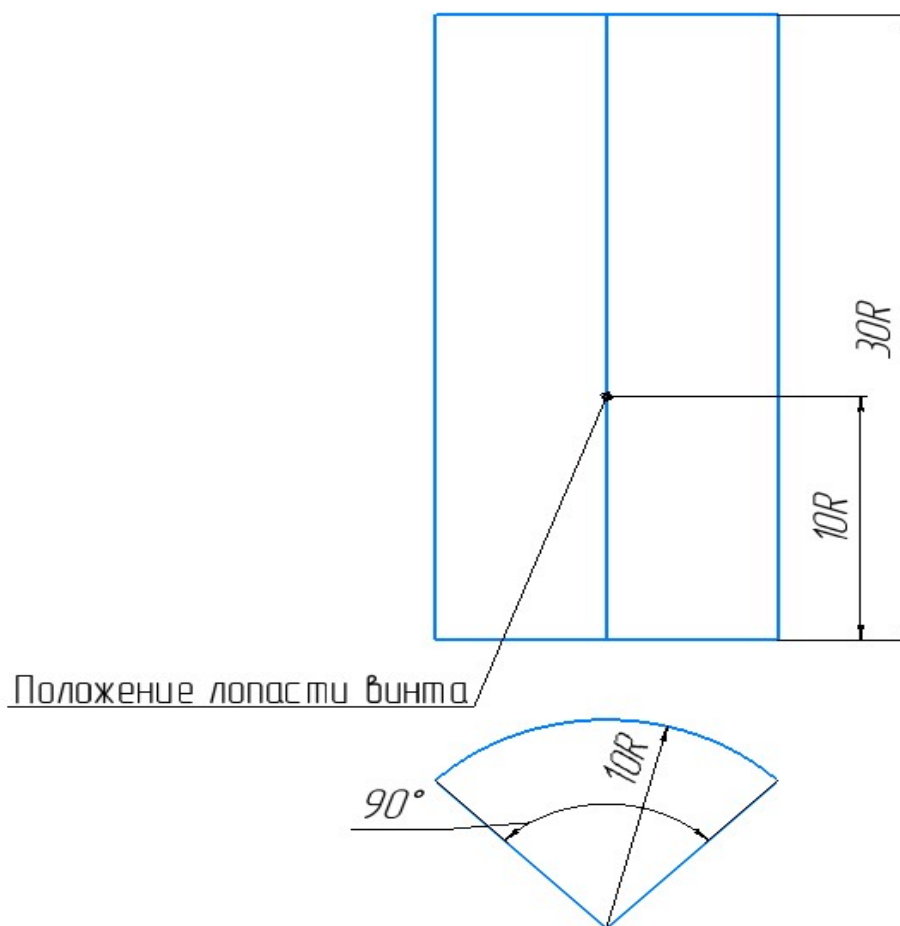


Рис.6.1 – Геометрия расчетной области

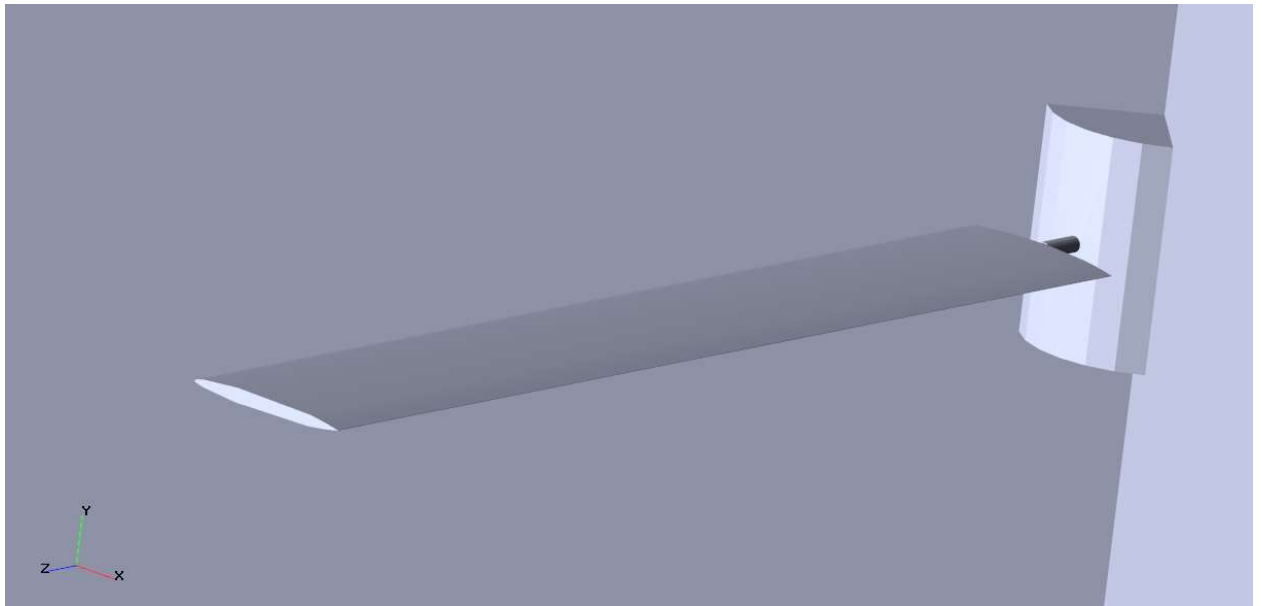


Рис.6.2 – CAD – модель винта с четвертью втулки

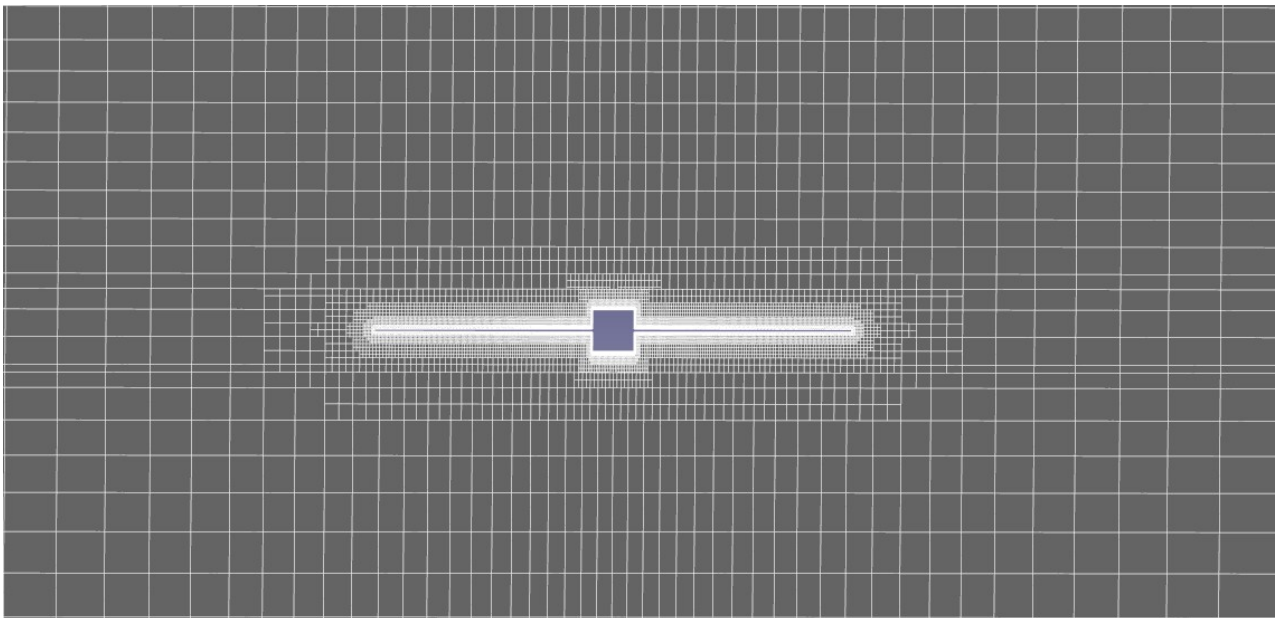


Рис.6.3 – Фрагмент расчетной сетки

7. Результаты моделирования несущего винта на режиме авторотации

При работе винта на режиме авторотации на больших скоростях вращения его обтекание стремится к обтеканию диска. Возникает характерное при обтекании диска повышенное давление в области перед телом, а также область пониженного давления в донной области. Вместе с этим, концевые вихри способствуют распространению части пониженного давления и на наветренную сторону, что приводит к падению сопротивления (Рис.7.1).

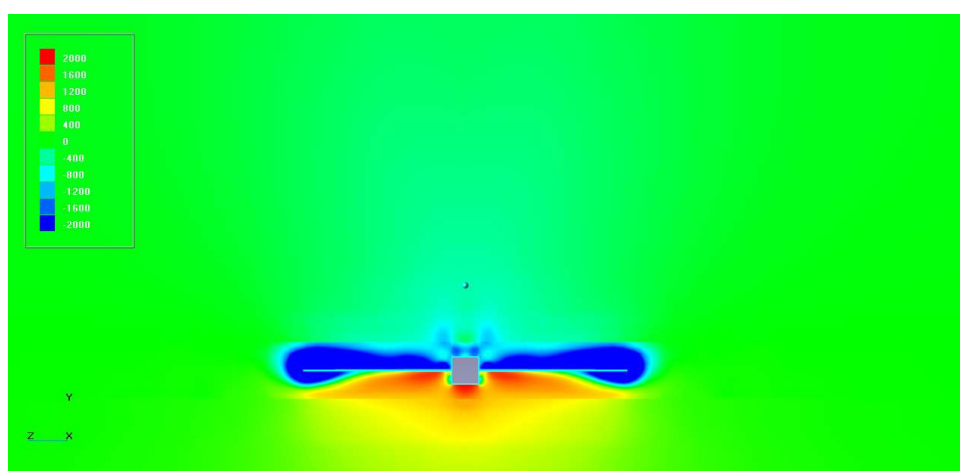


Рис.7.1 – Поле давления

Вследствие подобия винта диску, за ним возникает область отрывного донного течения с существенным понижением скорости (Рис.7.2). Винт пропускает через себя лишь малую часть потока, преимущественно из-за валов, крепящих лопасти к втулкам. Такое обтекание, когда часть потока проходит вблизи втулки, а за ней возникает турбулентный след, называется турбулентной авторотацией.

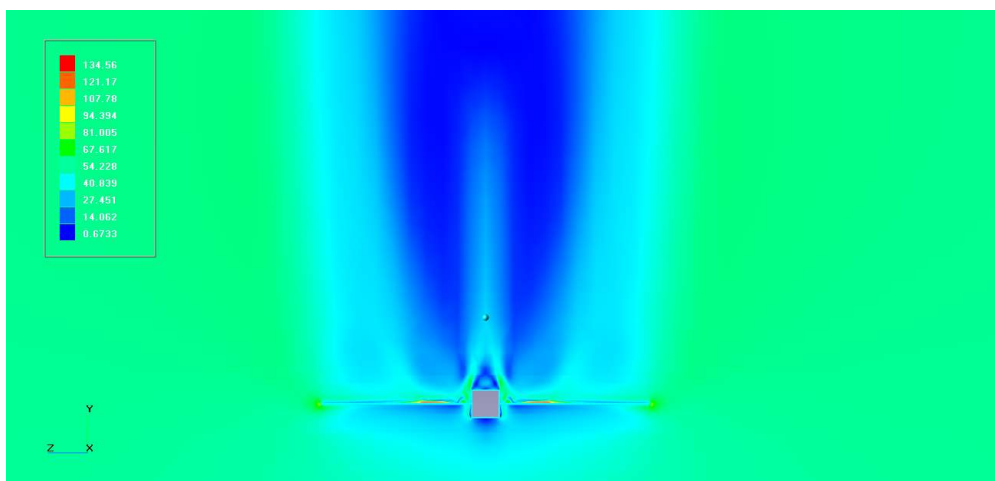


Рис.7.2 – Поле скорости

В результате численного моделирования была получена скорость установившегося вращения, равная 936 рад/с. Большое влияние на величину такой скорости оказывает момент трения, задаваемый перед расчетом. В данном случае, его величина равнялась 6 Нм, что является оценочным значением, полученным из предположения, что валы винтов будут закреплены в подшипниках скольжения.

8. Выводы

ПК FlowVision подходит для решения инженерных задач в области вертолетостроения. Численное моделирование с хорошей точностью воспроизводит экспериментальные исследования двухлопастного винта.

Встроенный в ПК FlowVision модуль авторотация позволяет найти скорость, которую разовьет винт в результате действия на него набегающего потока. Полученная скорость, равная 938 рад/с, позволяет винту не пропускать набегающий поток и значительно тормозить сам ЛА, кроме аэродинамического сопротивления, винт также создает небольшую тягу, дополнительно улучшающую аэродинамические свойства.

На основании полученных результатов, для численного моделирования всего МСА с четырьмя работающими винтами, необходимо подставить рассчитанную скорость в библиотеку turbinesFoam [7] в свободном пакете OpenFOAM.

9. Список литературы

- 1) Johnson, Wayne. 1980, Helicopter theory / Wayne Johnson Princeton University Press
Princeton, N.J
- 2) FlowVision. Руководство пользователя;
- 3) Андреева Е. М., Муратова Г. В. Многосеточный метод решения сильно несимметричных систем // ЖВТ. 2005. №5.
- 4) Федоренко Р.П. Релаксационный метод решения разностных эллиптических уравнений //Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1961. Т. 1, № 5. С. 922–927.
- 5) Бутюгин Дмитрий Сергеевич, Ильин Валерий Павлович, Перевозкин Данил Валерьевич Методы параллельного решения СЛАУ на системах с распределенной памятью в библиотеке krylov // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2012. №47 (306).
- 6) Caradonna F X and Tung C 1981 Experimental and Analytical Studies of a Model Helicopter Rotor in Hover, NASA Technical Memorandum 81232.
- 7) turbinesFoam, <https://github.com/turbinesFoam/turbinesFoam>.