

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите  
Директор ВШТМиМФ  
д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН  
\_\_\_\_\_ А.М. Кривцов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРАВЛЯЕМОСТИ**  
**ПОДВОДНОГО АППАРАТА ОТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ**

По направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»  
Направленность 01.04.03\_03 «Механика и цифровое производство»

Выполнил

студент гр. 5040103/10301

В.С. Потехин

Руководитель

доцент ВШТМиМФ, к. ф.-м. н.

В.Р. Мешков

Консультант

ассистент ВШТМиМФ

А.В. Киюц

Санкт-Петербург

2023

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
Физико-механический институт  
Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А.М. Кривцов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной  
работы**

студенту Потехину Валентину Сергеевичу, группы 5040103/10301

1. Тема работы: Исследование зависимости управляемости подводного аппарата от расположения движителей.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 26.05.2023
3. Исходные данные по работе: актуальные публикации по теме работы, исследования в области гидродинамики и машиностроения подводных аппаратов.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): построение геометрической модели подводного аппарата на основе реально существующего прототипа, построение и подбор характеристик винта движителя для достижения наибольшей тяги, моделирование и анализ прямолинейного и вращательного движений аппарата с различным расположением движителей для выявления оптимального.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): габаритный чертеж подводного аппарата, теоретический чертеж винта движителя, распределения и трёхмерные визуализации направления и скорости потока.
6. Консультанты по работе: А.В. Киюц, ассистент ВШТМиМФ.
7. Дата выдачи задания 27.02.2023

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ В.Р. Мешков, доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.  
(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 27.02.2023  
(дата)

Студент \_\_\_\_\_ В.С. Потехин  
(подпись) инициалы, фамилия

## РЕФЕРАТ

На 34 с., 28 рисунков, 2 таблицы

АВТОНОМНЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ,  
МЕТОД КОНЕЧНЫХ ОБЪЁМОВ, МЕТОД ВИРТУАЛЬНОЙ ПРОДУВКИ,  
РОТАТИВНАЯ УСТАНОВКА, SOLIDWORKS, FLOW SIMULATION

В данной работе было произведено построение трёхмерной геометрии автономного необитаемого подводного аппарата по существующему прототипу, а также его движительного комплекса; подобраны параметры винта, которые позволяют движителю достичь максимальной тяговой силы; произведено моделирование прямолинейного и поворотного движений аппарата в водной среде с разными углами наклона движителей. В результате данного моделирования получены результаты для скоростей и моментов вращения, что позволило выявить наиболее подходящий угол наклона движителей для данного аппарата. Для реализации данного моделирования были использованы габариты и масса реально существующего аппарата, а также информация о мощности его двигателей.

## ABSTRACT

34 pages, 28 figures, 2 table

AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE, FINITE VOLUME METHOD, VIRTUAL PURGING METHOD, ROTARY PLANT, SOLIDWORKS, FLOW SIMULATION

In this work, a three-dimensional geometry of an autonomous unmanned underwater vehicle was constructed based on the existing prototype, as well as its propulsion system; propeller parameters were selected that allow the propulsor to achieve maximum thrust force; simulations of rectilinear and rotary movements of the vehicle in an aquatic environment with different propulsor tilt angles were performed. As a result of this simulation, results were obtained for velocities and moments of rotation, which allowed identifying the most suitable angle of inclination of thrusters for this vehicle. To implement this simulation, the dimensions and mass of the real-life vehicle were used, as well as information about the power of its engines.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА.....	6
1.1. Модель динамики движения.....	6
1.2. Гидродинамические характеристики.....	8
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	9
2.1. Геометрическая модель корпуса аппарата.....	9
2.2. Построение движительного комплекса.....	12
ГЛАВА 3. РАСЧЁТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЁМОВ.....	17
3.1. Разбиение на конечные объёмы.....	17
3.2. Модель прямолинейного движения.....	18
3.3. Модель поворотного движения.....	21
3.4. Дополнительные расчёты для углов близ 45 градусов.....	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	31
Приложение 1. Габаритный чертёж АНПА.....	33
Приложение 2. Теоретический чертёж винта.....	34

## ВВЕДЕНИЕ

АНПА или автономный необитаемый подводный аппарат – это плавучий объект, подводный робот, напоминающий торпеду или подводную лодку, перемещающийся под водой с целью сбора информации о рельефе дна, строении верхнего слоя осадков, наличии на дне предметов и препятствий.

Таким образом, для эффективного сбора полезной информации с морского или речного дна необходима скорость и одновременная манёвренность аппарата ввиду достаточно разнообразного и сложного в плане передвижения подводного рельефа.

За передвижение и повороты подводного аппарата отвечает движительный комплекс, представляющий собой совокупность движителей – устройств, с помощью которых энергия двигателя преобразуется в полезную работу по перемещению аппарата по водной среде. Конечным звеном движителя является винт, который при вращении создаёт так называемую тяговую силу, толкающую аппарат в направлении, обратном направлению данной силы.

Существуют аппараты с разными конфигурациями движительных комплексов: с разным количеством движителей, различным расположением их на корпусе [16]. Для данной работе в качестве прототипа был выбран АНПА «Витязь Д» Центрального Конструкторского Бюро Морской Техники «Рубин» с расположением движителей под углом 45 градусов в количестве 4 штук на кормовой части аппарата. Такое расположение позволяет аппарату, не прибегая к помощи дополнительных движителей, производить как прямолинейное, так и поворотное движения за счёт попеременного увеличения или уменьшения скорости каждого из винтов.

Целью данной работы является подбор угла наклона движителей к оси аппарата, при котором устройство будет одновременно быстрым и обладать достаточной манёвренностью для передвижения по водной среде.

# ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

## 1.1. Модель динамики движения

В настоящее время для анализа динамических свойств подводных аппаратов используется имитационная модель, представляющую собой пространственное движение аппарата в локальной системе координат:

$$\dot{X} = V\Phi[\varphi(U), \psi(U)\gamma(U)] + W, \quad (1)$$

где  $V$  – вектор скорости набегающего потока,  $\Phi$  – матрица тригонометрических преобразований угловых величин, зависящих от управления  $U$ ,  $W$  – вектор возмущений.

При переходе к скалярной форме получим выражения данного вида:

$$\begin{cases} \dot{X} = v(U) \cos\varphi(U) \cos\psi(U) + v_{TX} \\ \dot{Y} = v(U) \sin\psi(U) + v_{TY} \\ \dot{Z} = v(U) \cos\psi(U) \sin\varphi(U) + v_{TZ} \end{cases} \quad (2)$$

где  $v$  – скорость,  $\varphi$  – курс;  $\psi$  – дифферент;  $X, Y, Z, v, \varphi, \psi, \{v_{TX}, v_{TY}, v_{TZ}\}$  – вектор течения.

Для построения динамической модели движения АНПА в вязкой среде используются выражения уравнений для действующих сил и моментов через законы гидромеханики. Жидкость предполагается идеальной, главные оси инерции аппарата, а также его оси симметрии полагаются совпадающими, приращения угловых кинематических параметров считаются малыми при составлении этих уравнений. Для существующих типов подводных аппаратов и большинства видов их движения данные допущения являются справедливыми [4, 5, 12].

$$\begin{cases} M\dot{v} = R_v(v) + F_v(U_B, U_\Gamma), v = \|v_i\|_1^3 \\ \dot{x} = R_x(v, x) + F_x(U_B, U_\Gamma) + w, x = \|x_i\|_1^6 \\ \dot{X} = v\Phi[x(U_\Gamma, U_B)] + W, X = \|X_i\|_1^3 \end{cases} \quad (3)$$

где верхнее выражение описывает изменение скорости центра масс, среднее – угловое движение относительно центра масс, а нижнее – движение в инерциальном пространстве.

Большинство случаев исследования режимов движения проходит с разделением данной системы на ряд взаимосвязанных подсистем, которые описывают движения в плоскостях симметрии, а именно в горизонтальной и вертикальной:

$$\begin{cases} m_x \dot{v} = -R_x(v, \alpha) + P \sin \vartheta + T_{x1} \cos \alpha - T_{y1} \sin \alpha + R_{xd} \\ m_y v \dot{\vartheta} = R_y(v, \alpha, \psi) + P \cos \vartheta + T_{y1} \cos \alpha + T_{x1} \sin \alpha + R_{yd} \\ I_{zz} \ddot{\psi} = M_0 \sin \psi + M_z(v, \alpha, \psi) + M_{z \text{ упр}} \\ \dot{X} = v \cos \vartheta + v_{Tx}, \dot{Y} = v \sin \vartheta + v_{Ty}, \psi = \vartheta + \alpha \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} m_x \dot{v} = -R_x(v, \beta) + T_{x1} \cos \beta - T_{z1} \sin \beta + R_{xd} \\ m_z v \dot{\chi} = R_z(v, \beta, \phi) + T_{z1} \cos \beta + T_{x1} \sin \beta + R_{zd} \\ I_{yy} \ddot{\phi} = M_y(v, \beta, \phi) + M_{y \text{ упр}} \\ \dot{X} = v \cos \chi + v_{Tx}, \dot{Z} = v \sin \chi + v_{Tz}, \phi = \chi + \beta \end{cases} \quad (5)$$

Геометрические пропорции корпуса, а также ориентация аппарата относительно потока оказывают влияние на особенность динамической модели, связанной с определением присоединённых масс и моментов инерции жидкости. На аппараты симметричной формы данное влияние принимается за увеличение массы и моментов инерции.

При переменных значениях, допускающих линеаризацию, уравнения принимают вид:

$$\begin{cases} \dot{v} = -R_x v^2 + b_v U_v(v, U_x, U_y) \\ \dot{x}_i = \sum_j R_{ij} x_j + b_i U_x, \quad i, j = 1 \dots 4 \\ \dot{X} = v \cos(x_2/v), \dot{Y} = v \sin(x_2/v) \\ \dot{y}_i = \sum_j c_{ij} y_j + d_i U_y, \quad i, j = 1 \dots 3 \\ \dot{Y} = v \cos(y_2 - y_1), \dot{Z} = v \sin(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения относительно  $x = \{x_i\}$  и  $y = \{y_i\}$  при линейном управлении  $U_x = k_x x$  и  $U_y = k_y y$  представим в векторно-матричном виде и получим окончательный вид выражений для компонент скоростей:

$$\dot{x} = (A + b k_x) x, \dot{y} = (C + d k_y) y \quad (7)$$



## 1.2. Гидродинамические характеристики

Ввиду большого значения сил вязкого сопротивления на исследования динамических свойств подводных аппаратов обычно для приближенной оценки гидродинамических характеристик используются известные расчётно-теоретические модели и эмпирические зависимости, полученные на основе апробированных методов, а именно:

- метода подобия аппарату-прототипу
- расчётно-теоретические методов
- метода использования гидродинамических конечно-элементных пакетов
- прямых измерений на реальных исследованиях

Принятые при построении модели уравнения должны описывать движение аппарата с необходимой точностью, а также соответствовать реальности.

С помощью «виртуальной продувки» трёхмерной геометрии аппарата в наглядном виде можно строить диаграммы полей скоростей и давлений для разных видов обтекания корпуса модели, а также графики зависимости сил сопротивления потоку от скорости и угла атаки. По результатам продувки пространственной модели определяются гидродинамические характеристики аппарата, а именно продольной, вертикальной и боковой сил сопротивления, а также курсового и дифферентующего моментов:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x(v, \alpha) = C_x(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} = R_x(1, \alpha) v^2 \\ R_y(v, \alpha) = C_y(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} = R_y(1, \alpha) v^2 \\ R_z(v, \beta) = C_z(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V^{\frac{2}{3}} = R_z(1, \beta) v^2 \\ M_y(v, \beta) = m_y(\beta) \frac{\rho v^2}{2} V = M_y(1, \beta) v^2 \\ M_z(v, \alpha) = m_z(\alpha) \frac{\rho v^2}{2} V = M_z(1, \alpha) v^2 \end{array} \right. \quad (7)$$

## ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

### 2.1. Геометрическая модель корпуса аппарата

Так как в работе производится моделирование разных видов движения по водной среде методом конечных элементов в конечно-элементном добавлении Flow Simulation CAD-пакета для трёхмерного моделирования SolidWorks, необходимо построение трёхмерной геометрической модели, над которой будут производиться необходимые гидродинамические расчёты. Для этого был произведён подбор аппарата-прототипа с известными габаритными размерами, массовыми характеристиками, а также возможностью выяснения информации о мощности двигателей.

В качестве прототипа в данной работе выступил автономный необитаемый подводный аппарат «Витязь Д» Центрального Конструкторского Бюро Морской Техники «Рубин». Устройство представляет собой тело торпедовидной формы с четырьмя движителями, расположенными под углом 45 градусов относительно горизонтальной оси аппарата (рис. 1).



Рис. 1. АНПА «Витязь Д»

С официального сайта ЦКБ МТ «Рубин»[17] были взяты необходимые характеристики АНПА, а именно линейный габаритный размер, диаметр аппарата и масса. Также на сайте представлена предельная глубина погружения, что помогает дать понимание того, какое давление может выдержать корпус устройства и какое значение выставлять в начальных условиях при расчёте(табл. 1).

Длина	5.7 м.
Диаметр	1.3 м.
Масса	5.7 т.
Предельная глубина погружения	до 12000 м.

Табл. 1. Характеристики АНПА «Витязь Д»

Так как подводный аппарат имеет торпедовидную форму, необходимо рассчитать кривые носов ой и кормовой частей для построения корпуса по формулам[11, 14]:

$$r(x)_{head} = \frac{1}{2}d \sqrt{1 - \left(\frac{x-a}{a}\right)^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (8)$$

$$r(x)_{stern} = \frac{1}{2}d - \left(\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan\delta}{c}\right)(x-a-b)^2 + \left(\frac{d}{c^3} - \frac{\tan\delta}{c^2}\right)(x-a-b)^3, \quad a+b \leq x \leq a+b+c \quad (9)$$



Рис. 2. Геометрическая форма корпуса

Подставив значения из табл. 1, а также подобрав угол наклона кривой в кормовой части в формулы (8) и (9), были получены кривые для носовой и кормовой частей, благодаря которым можно построить профиль геометрической формы аппарата, который с помощью метода тела вращения был построен в САD-пакете для трёхмерного моделирования SolidWorks[1].

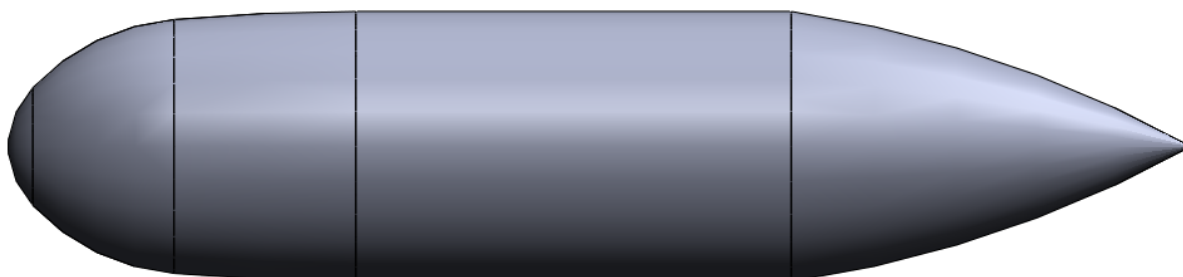


Рис. 3. Построенная модель формы

Для завершения построения корпуса АНПА необходимо построить крылья кормовой части, которые являются стабилизатором движения аппарата на высоких скоростях, создавая прижимные силы с обеих сторон каждого крыла, которые не позволяют аппарату произвольно вращаться вокруг собственной оси, что может помешать его управляемости.

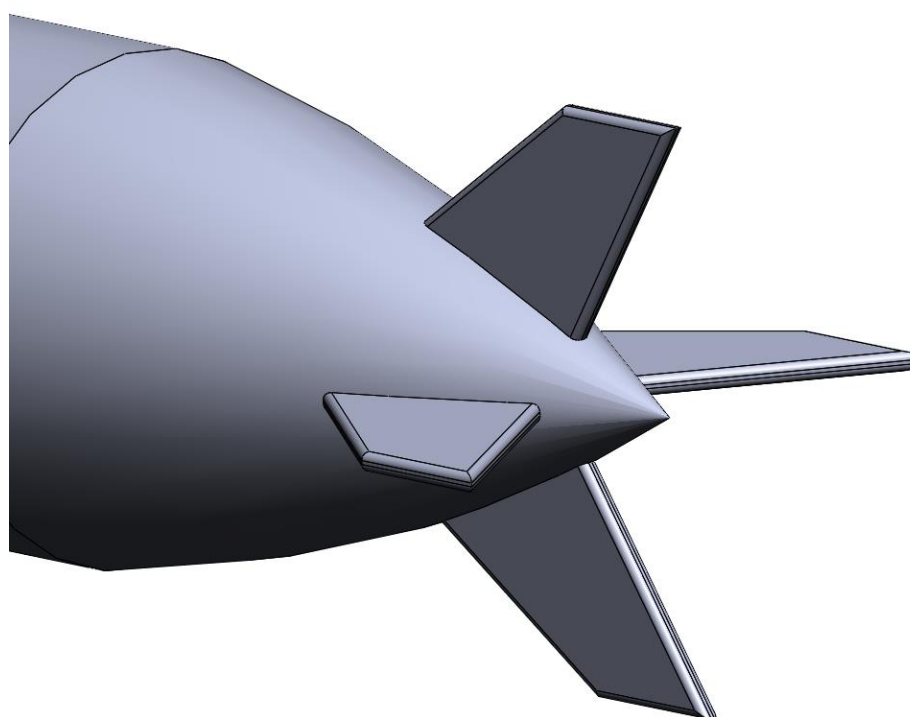


Рис. 4. Крылья кормовой части

Также для закрепления движителей на корпусе требуются дополнительные построения в виде площадок, отдалённых от корпуса и расположенных под углом к оси аппарата.

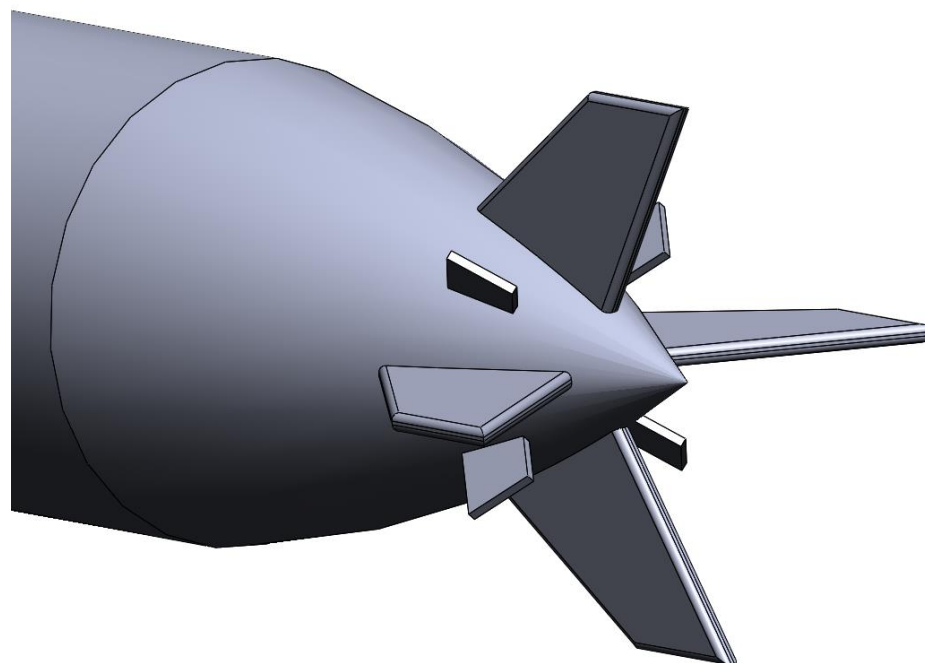


Рис. 5. Крепления движителей

## 2.2. Построение движительного комплекса

Движительным комплексом модели данного подводного аппарата является совокупность движителей под углом к оси АНПА. Основой для моделирования стало расположение винтов на автономном необитаемом подводном аппарате «Витязь Д» ЦКБ МТ «Рубин», движители которого расположены под углом 45 градусов. Чёрные винты аппарата вращаются по часовой стрелке, а жёлтые – против, что видно на рис. 6. Данные особенности расположения позволяют аппарату за счёт соединения потоков и стабилизации моментов вращения создать максимальную тяговую силу для скоростного передвижения по прямолинейной траектории, а также ввиду постановки винтов под углом совершать поворотное движение, не прибегая к помощи дополнительных движителей.



Рис. 6. Двигательный комплекс АНПА «Витязь Д»

Необходимым условием для создания максимальной тяговой силы при прямолинейном движении аппарата является создание максимальной тяговой силы непосредственно винтом двигателя. Для этого необходимо при построении геометрии винта подобрать параметры так, чтобы поток был максимально направлен вдоль оси вращения винта.

Основными подбираемыми характеристиками винта являются его диаметр и шаг. Шагом винта является расстояние, пройденное поступательно винтом, ввинчивающимся в неподвижную среду, за один полный оборот. Также необходимо построить профиль винта, который будет создавать тягу, необходимую для эффективного движения устройства, частью двигателя которого, является данный винт.

Используемый в данной работе винт является четырёхлопастным с лопастью, слегка перекрывающей начало области действия следующей во избежание проскальзывания при вращении, а подобранные для его построения параметры: диаметр  $d = 250$  мм и шаг  $h = 250$  мм. Профилем винта является вытянутая несимметричная округлая поверхность со скруглениями по краям для эффективного ввинчивания в водную среду при вращении[3, 7].

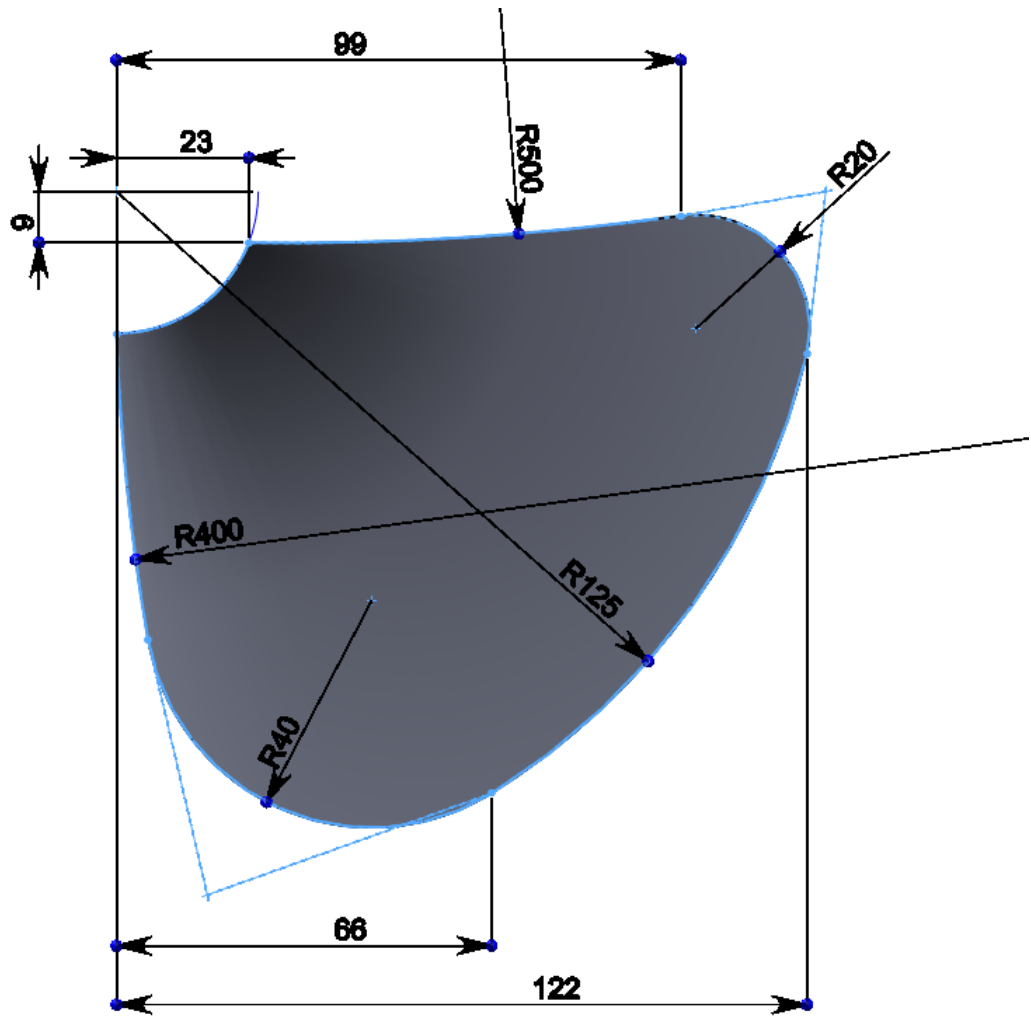


Рис. 7. Профиль лопасти винта

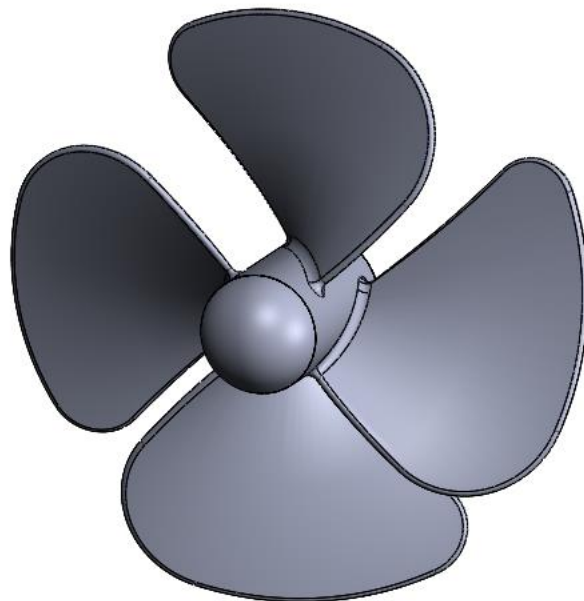


Рис. 8. Геометрическая модель винта движителя



Чтобы удостовериться в пригодности винта, необходимо провести расчёт, из которого можно будет отследить, направление потока создаваемого винтом, а также его тяговую силу. Расчёт будет проводиться в добавлении Flow Simulation CAD-пакета для трёхмерного моделирования SolidWorks.

Для проведения расчёта задаётся расчётная область, из которой будет браться жидкость, а именно вода, и область вращения, представляющую собой цилиндрическое тело, не участвующее в расчёте, но все элементы, в неё помещённые, совершают движение вокруг оси вращения. Также задаётся давление равное 0.5 МПа и скорость вращения непосредственно самого винта – 50 рад/с.

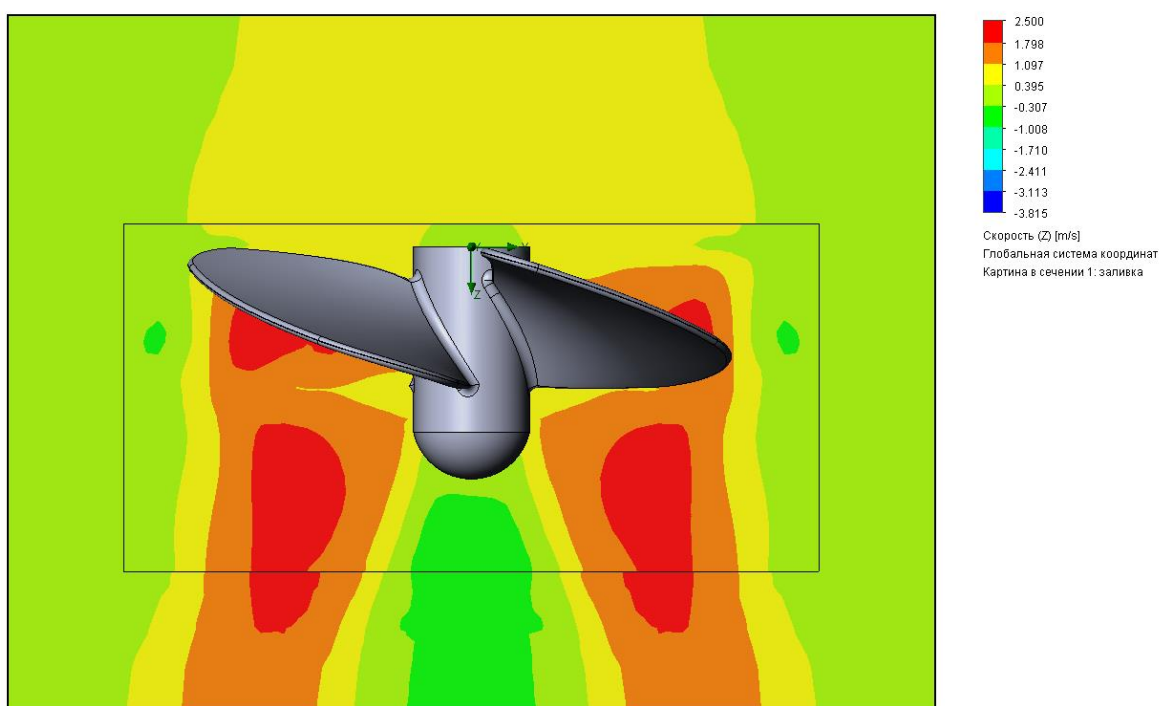


Рис. 9. Распределение скоростей потока, создаваемого винтом

Из полученного распределения скоростей можно увидеть, что поток направлен вдоль оси вращения движителя, что подтверждает пригодность винта для использования при расчёте модели вместе с установленным движительным комплексом.

Для закрепления винтов на модели необходимо дополнительно построить тело движителя, представляющее собой цилиндрический трёхмерный объект с плоскостью для сопряжения с креплениями на корпусе.



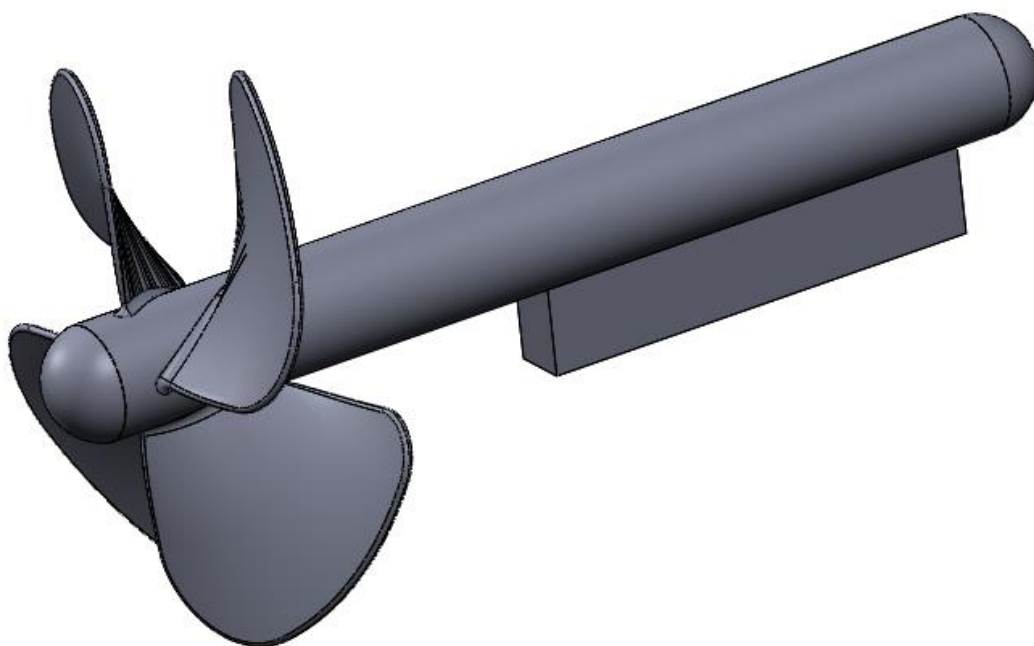


Рис. 10. Геометрическая модель сборки двигателя

Ввиду особенности расположения был построен дополнительный винт с зеркальным профилем лопасти и крутящийся в обратном направлении. В сборке это даст соответствие движительному комплексу прототипа, в котором двигатели, попарно вращаясь в разных направлениях создают тяговую силу необходимую для перемещения аппарата.

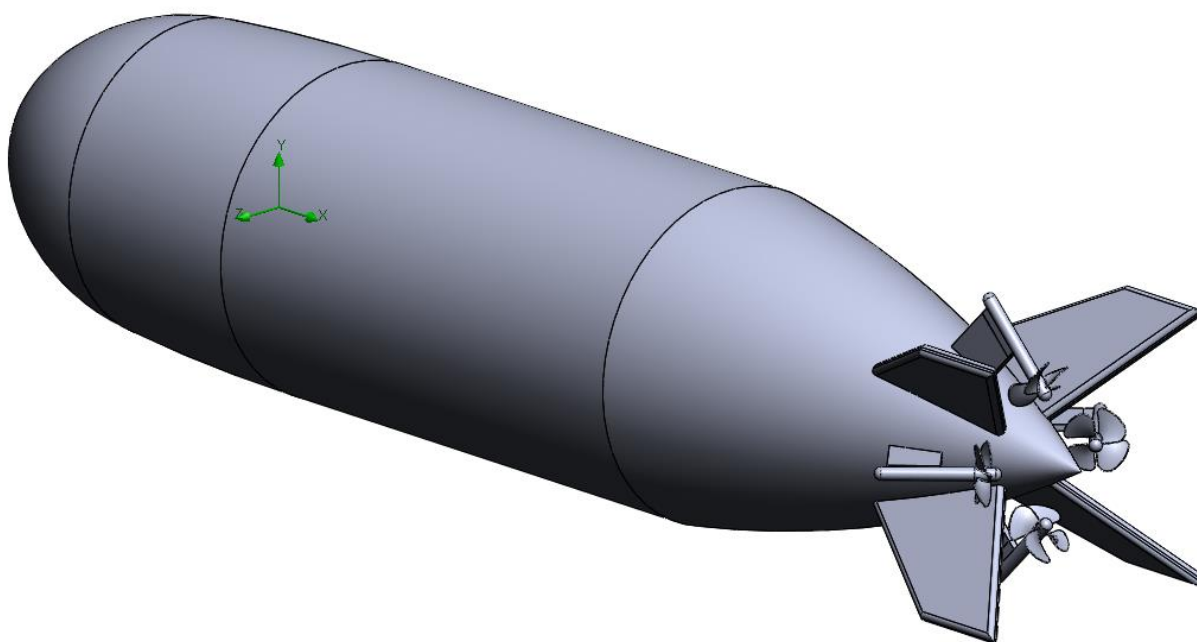


Рис. 11. Сборка модели с движительным комплексом

## ГЛАВА 3. РАСЧЁТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЁМОВ

В данной главе будет рассмотрено два вида движения аппарата с разными углами наклона движителей:

- прямолинейное
- поворотное

Данные расчёты позволят вычислить скорость аппарата при прямолинейном движении в режиме работы всех движителей, а также вращающий момент вокруг вертикальной оси при вращении одного винта, провести сравнительный анализ данных значений в зависимости от угла наклона движителей и выяснить, какое из значений будет являться наиболее подходящим для обоих видов движения. Моделирования прямолинейного и поворотного видов движения, а также расчёт методом конечных объёмов будут производиться в добавлении Flow Simulation для CAD-пакета трёхмерного моделирования SolidWorks[2].

### 3.1. Разбиение на конечные объёмы

Для построения расчётов методом конечных объёмов на геометрическое модели строится сетка, представляющая собой разбиение геометрии подводного аппарата на участки, в каждом из которых будет производиться локальный расчёт. В наиболее интересных для расчёта местах конечно-элементная модель уточняется, что представляет собой дробление базовой сетки на более мелкие элементы. Для корректности построения модели был проведён ряд предварительных расчётов с увеличением уровня разбиения, пока значения, полученные в результате расчёта не переставали изменяться. Данную конечно-элементную модель можно считать корректной и использовать в дальнейших расчётах. Количество элементов данной сетки составляет 289046 размером 5 мм.

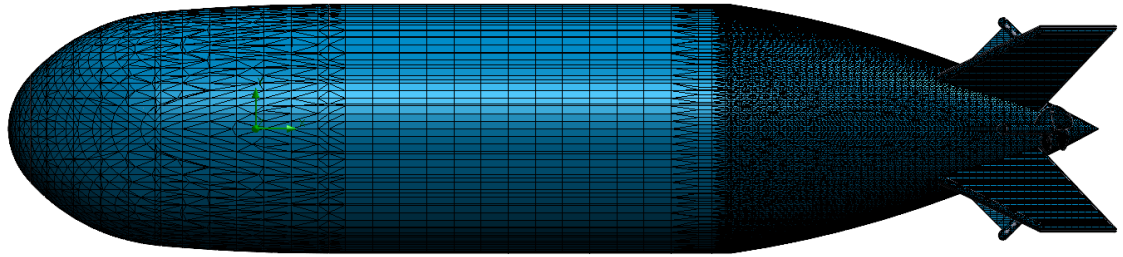


Рис. 12. Разбиение на конечные объёмы

### 3.2. Модель прямолинейного движения

Так как добавление Flow Simulation рассчитано на проведение квазистационарных расчётов, построение движения аппарата в привычном понимании значения этого слова не представляется возможным. Решением этой проблемы является моделирование движения методом виртуальной продувки.

Реализация данного метода происходит путём создания набегающего потока, воздействующего на модель, дополнительно к потоку, созданному вращением винтов. Подбор скорости набегающего потока производится за счёт сравнения тяговой силы, создаваемой винтами и силы лобового сопротивления аппарата набегающему потоку. Имитация прямолинейного движения АНПА происходит при равенстве данных сил, а подобранная скорость набегающего потока и будет являться скоростью движения аппарата в водной среде по прямой.

Для проведения непосредственно расчёта необходимо задать расчётную область больше габаритных размеров аппарата, жидкость из которой будет использована при моделировании движения. Так как длина АНПА 5.7 метров, а диаметр 1.3 метра, была построена расчётная область 7x2x2 метра, чего достаточно для расчёта прямолинейного движения.

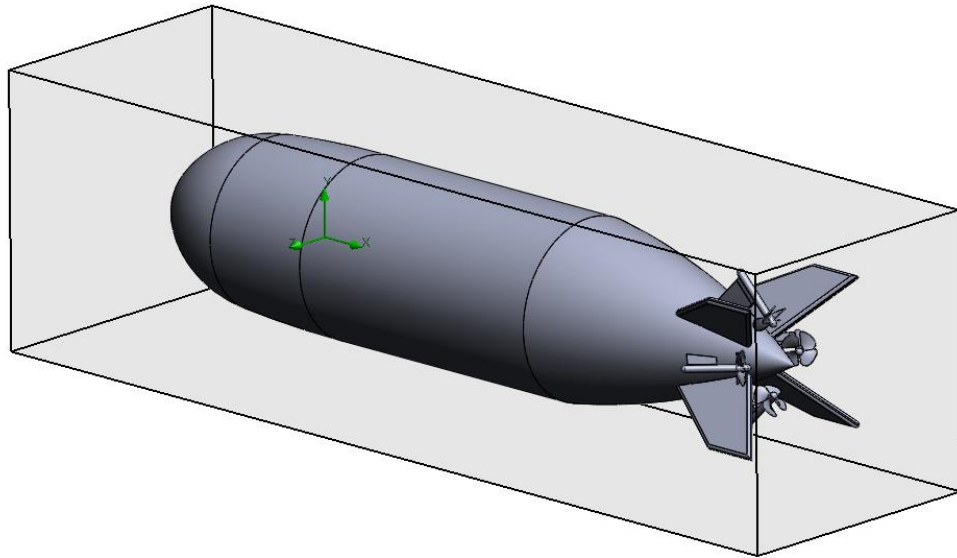


Рис. 13. АНПА в расчётной области

Также необходимо задать скорость вращения винтов равную 50 рад/с, давление воды на аппарат – 0.5 МПа и ускорение свободного падения –  $9.81 \text{ м/с}^2$ , направленное вертикально вниз и скорость набегающего потока, подобранную отдельно для каждого угла наклона движителей.

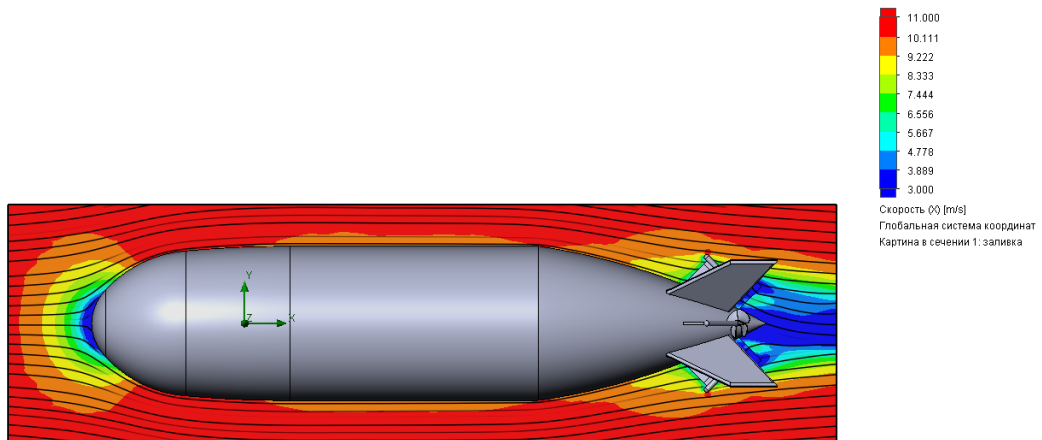


Рис. 14. Распределение скоростей под углом 45 градусов со скоростью набегающего потока – 10.52 м/с

Первым является под углом 45 градусов, который позволит сравнить скорость прототипа и построенной трёхмерной компьютерной модели. При переводе в километры в час скорость смоделированного аппарата равна 37.87 км/ч, что с учётом всех погрешностей моделирования и недостаточной проработки отдельных элементов на корпусе и внутри корпуса модели позволяет сказать, что сравнима с максимальной скоростью реального

прототипа равной 25 км/ч. Учитывая данные результаты, можно сказать, что данный расчёт приближен к реальности.

Далее с интервалом в 15 градусов, начиная от 45 до 0 градусов будут проведены расчёты, построены распределения для скоростей потока и вычленена скорость прямолинейного движения аппарата.

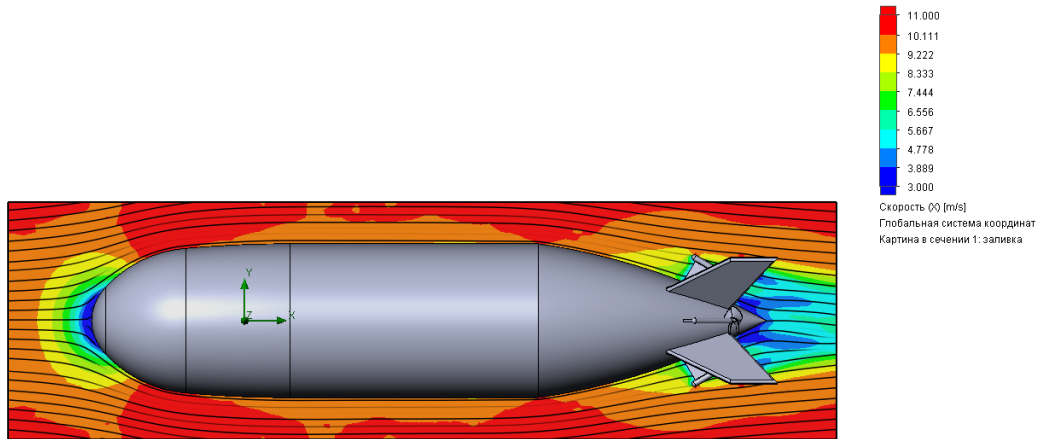


Рис. 15. Распределение скоростей под углом 30 градусов со скоростью набегающего потока – 10.25 м/с

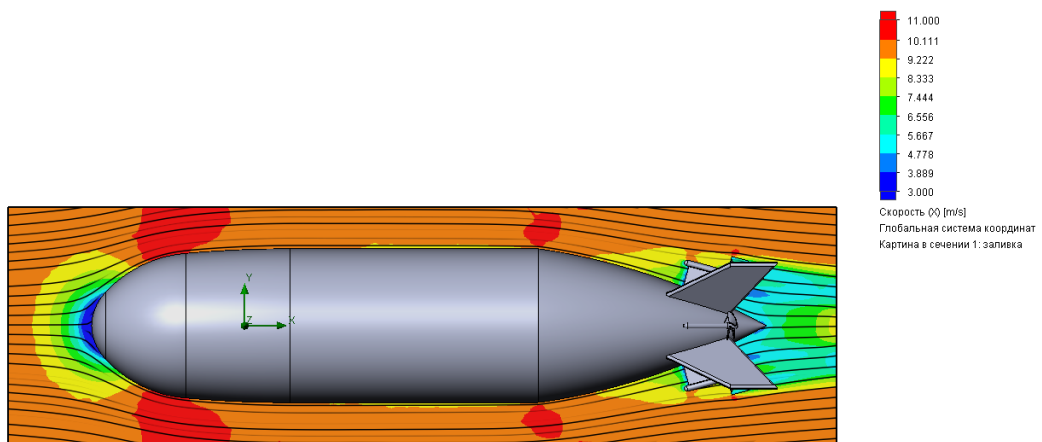


Рис. 16. Распределение скоростей под углом 15 градусов со скоростью набегающего потока – 10 м/с

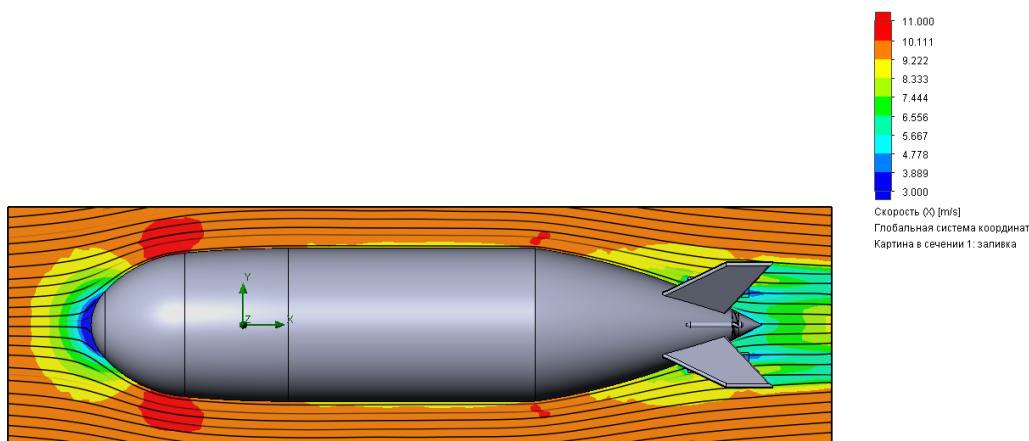


Рис. 17. Распределение скоростей под углом 0 градусов со скоростью набегающего потока – 9.88 м/с

Проанализировав результаты расчётов прямолинейного движения для данных углов, можно сделать вывод, что при угле 45 градусов достигается тяговая сила, которая позволяет аппарату развивать наибольшую скорость относительно остальных вариантов. При уменьшении углов с таким интервалом можно заметить, что скорость снижается из-за слабого пересечения потоков винтов, из чего следует уменьшение общей тяговой силы, действующей вдоль линейной оси аппарата. Особенно большое снижение скорости заметно при расположении движителей по углом 0 градусов к оси, где каждый винт создаёт лишь локальную тяговую силу.

### 3.3. Модель поворотного движения

При моделировании поворотного движения подводного аппарата за основу была взята ротативная установка, представляющая собой устройство позволяющее осуществлять круговое движение модели относительно вертикальной оси и измерять силы и моменты, действующие на модель. Обычно ротативные установки размещаются в прямоугольных либо круглых(циркуляционных) бассейнах. Размеры ротативных установок, используемых для измерения гидродинамических характеристик моделей судов, колеблются в пределах от 15 до 75 метров, если считать по наибольшему диаметру траектории испытываемой модели. Максимальная



линейная скорость модели на различных ротативных установках варьируется от 3 до 25 м/с[6, 10, 13].



Рис. 18. Ротативная установка

Добавление Flow Simulation позволяет задать для объектов область вращения, являющуюся отдельным цилиндрическим объектом, внутри которого все тела совершают вращательное движение вокруг вертикальной оси, расположенной в центре данного цилиндра, и который не участвует в расчёте. Аппарат в области вращения помещается в расчётную область, больше области вращения.

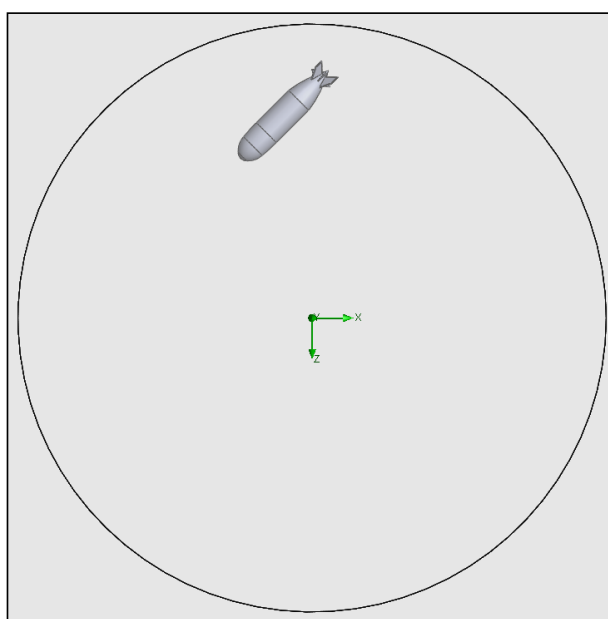


Рис. 19. АНПА в области вращения

В данном расчёте аппарат располагается под углом, равным углу наклона движителя, на расстоянии двух своих линейных габаритных размеров и совершает дрейфующее движение вокруг вертикальной оси области вращения при в работе одного бокового винта. Тем самым тяговая сила, создаваемой винтом, а значит и скорость движения аппарата будет направлена по касательной к траектории поворотного движения. Скорость вращения самого аппарата в данной модели ротативной установки вычисляется подбором, условием выполнения которого является равенство тяговой силы, создаваемой за счёт вращения винта. Результатом расчёта является значение вращательного момента, что позволит сделать выводы об управляемости подводного аппарата[9, 15].

Давление жидкости, как и в расчёте прямолинейного движения составляет 0.5 МПа, ускорение свободного падения –  $9.81 \text{ м/с}^2$ , а скорость вращения винта –  $50 \text{ рад/с}$ .

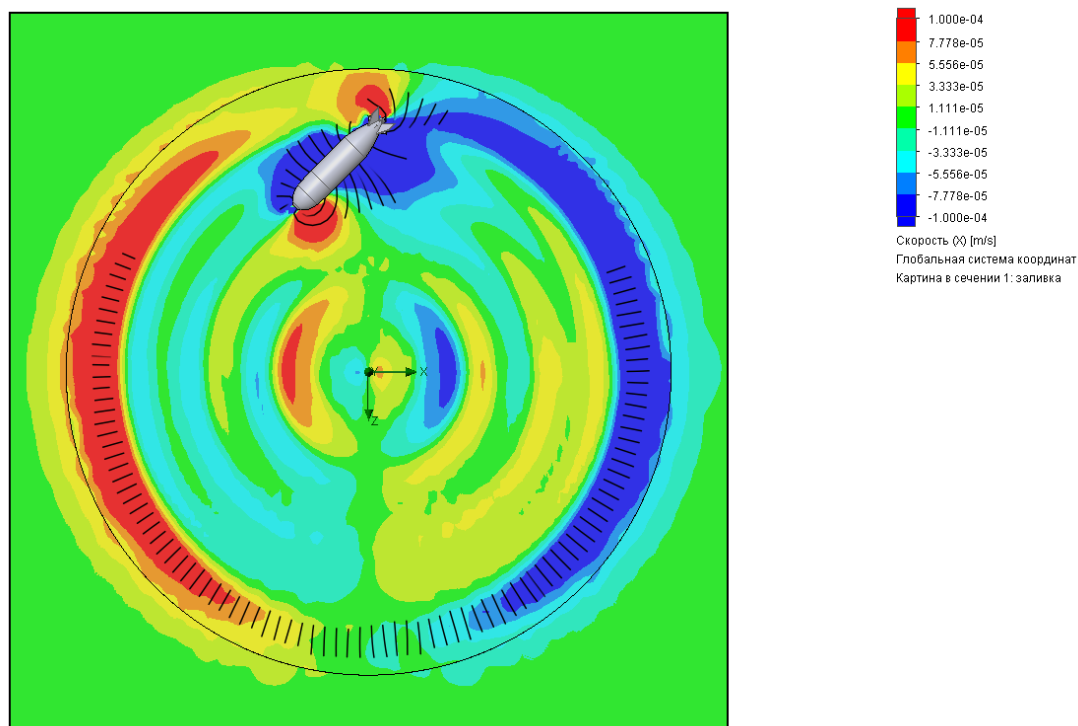


Рис. 20. Распределение скоростей под углом 45 градусов, момент вращения –  $61.78 \text{ Н*м}$



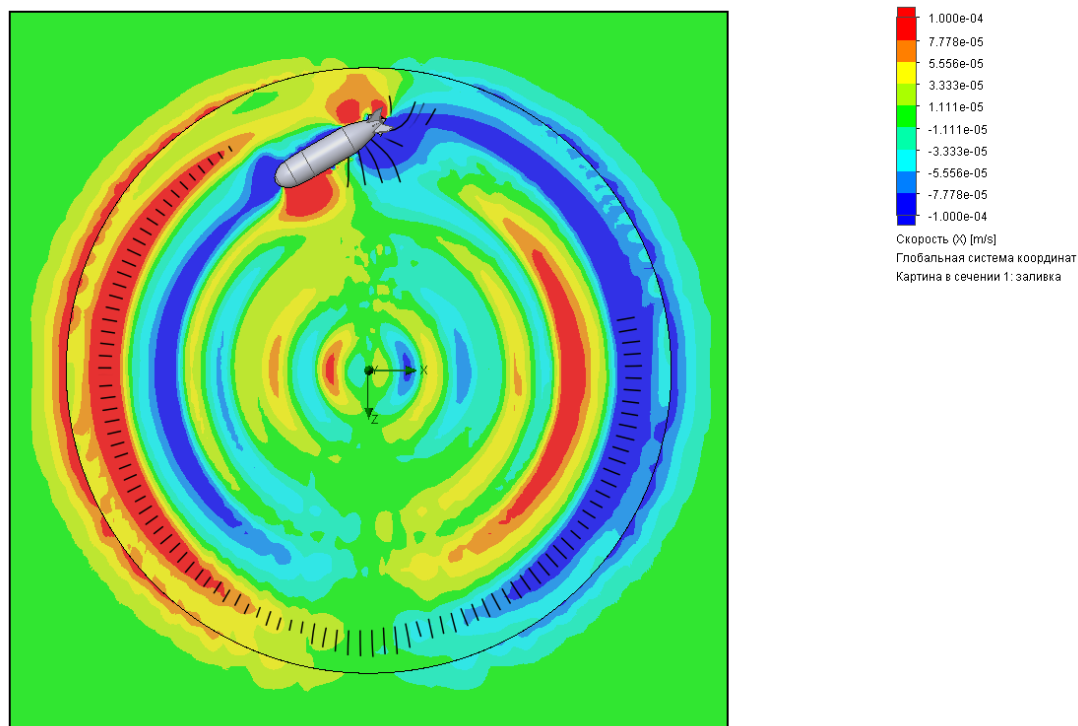


Рис. 21. Распределение скоростей под углом 30 градусов, момент вращения —  
33.08 Н\*м

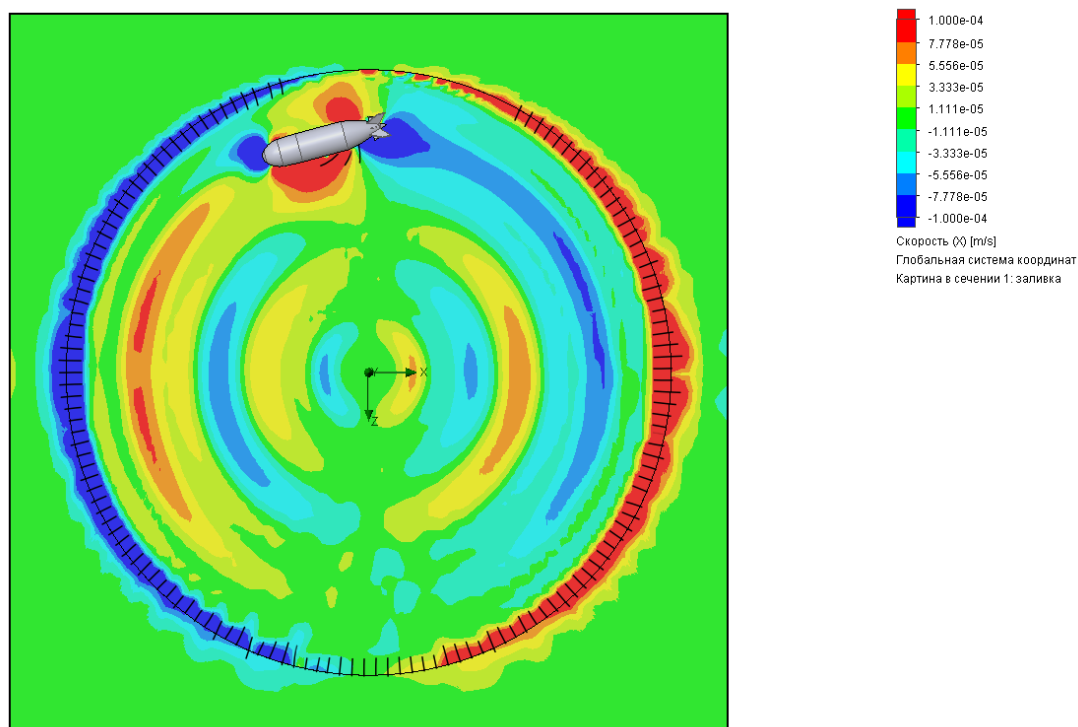


Рис. 22. Распределение скоростей под углом 15 градусов, момент вращения —  
19.89 Н\*м

Из данных расчётов для поворотного движения аппарата можно сделать вывод, что при уменьшении угла наклона относительно 45 даже на 15 градусов

даёт ухудшение в значении момента вращения почти в два раза. Таким образом наиболее подходящим для поворотного движения является угол 45 градусов.

### 3.4. Дополнительные расчёты для углов близ 45 градусов

Угол, градусы	Линейная скорость, м/с	Вращающий момент, Н*м
45	10.52	61.78
30	10.25	33.08
15	10	19.89
0	9.88	-

Табл. 2. Промежуточные результаты

Ввиду того, что угол 45 градусов имеет большое преимущество при обоих видах движения даже относительно уменьшения угла на 15 градусов, было принято решение сделать расчёты для углов наклона, близлежащих 45, а именно 35, 40 и 50 градусов.

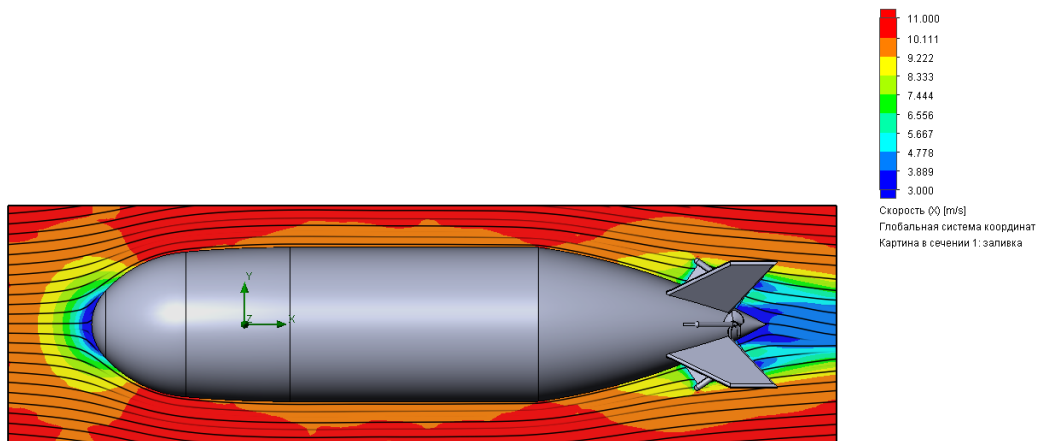


Рис. 23. Распределение скоростей под углом 35 градусов со скоростью набегающего потока – 10.28 м/с

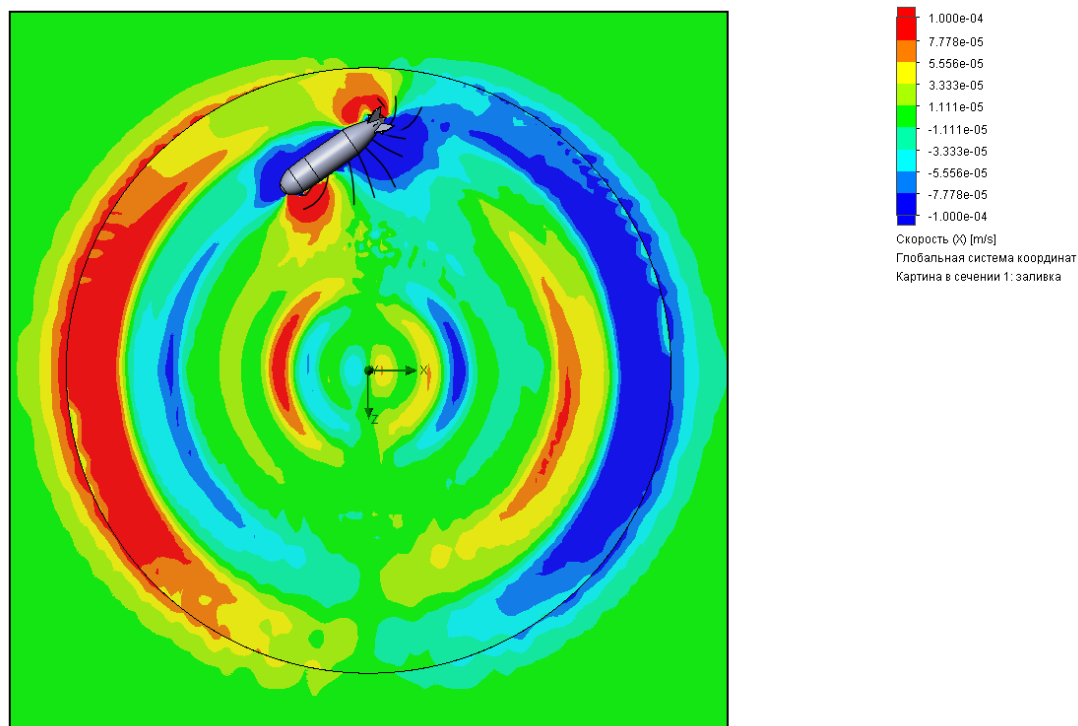


Рис. 24. Распределение скоростей под углом 35 градусов, момент вращения – 42.03 Н\*м

Из расчётов для данного угла видно, что и значение линейной скорости ниже по сравнению с углом наклона 45 градусов, и момент вращения, что не позволяет данному углу наклона хоть в каком-то виде движения конкурировать с углом 45.

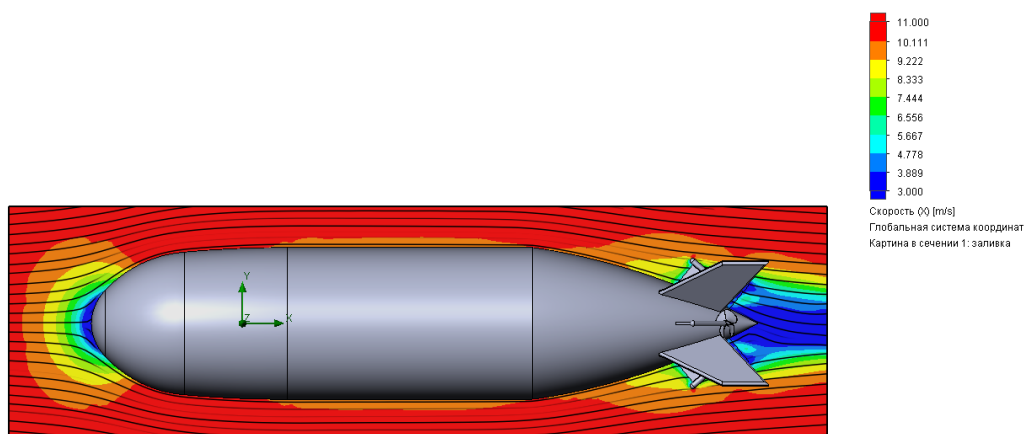


Рис. 25. Распределение скоростей под углом 40 градусов со скоростью набегающего потока – 10.59 м/с

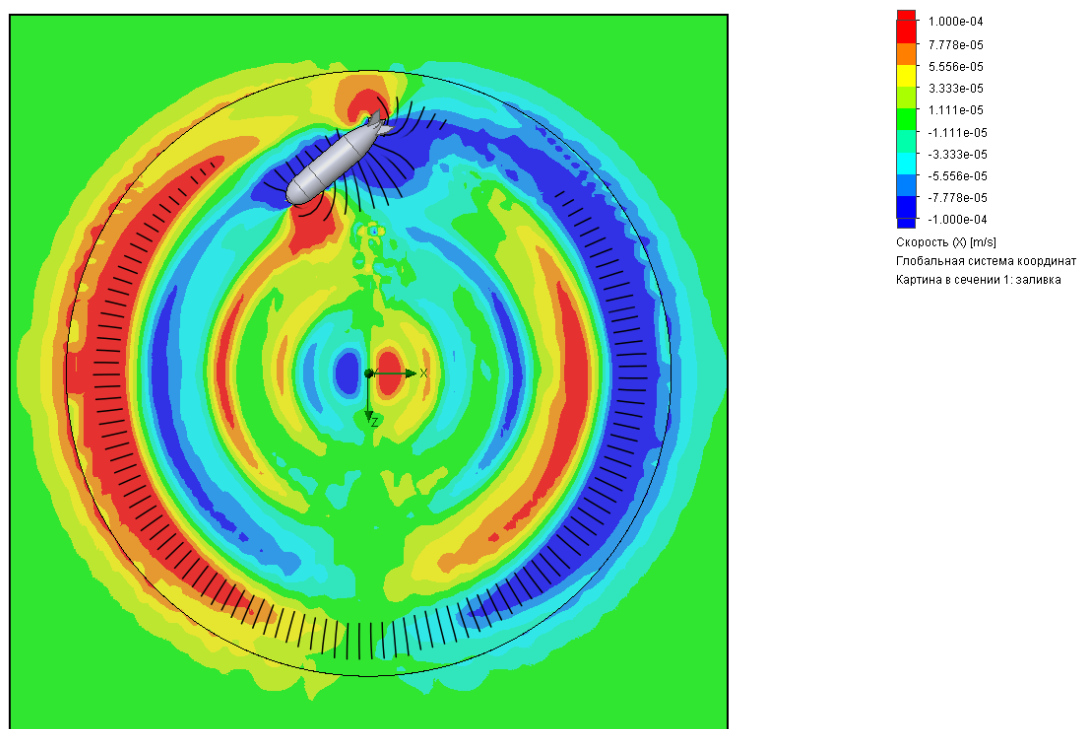


Рис. 26. Распределение скоростей под углом 40 градусов, момент вращения –  $52.53 \text{ Н*м}$

По результатам данных расчётов было получено значение скорости прямолинейного движения, превосходящее значение при угле 45 градусов на  $0.07 \text{ м/с}$ , но при этом значение вращательного момента ниже почти на 10%. Проанализировав результаты, можно сделать вывод о том, что данный прирост линейной скорости является незначительным, особенно при таком убытке в значении момента, что делает аппарат на почти десятую часть менее манёвренным.

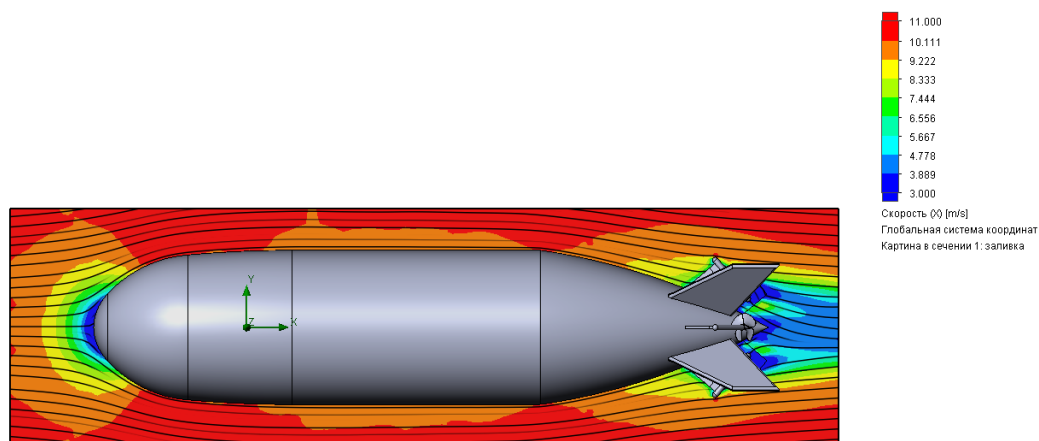


Рис. 27. Распределение скоростей под углом 50 градусов со скоростью набегающего потока –  $10.34 \text{ м/с}$

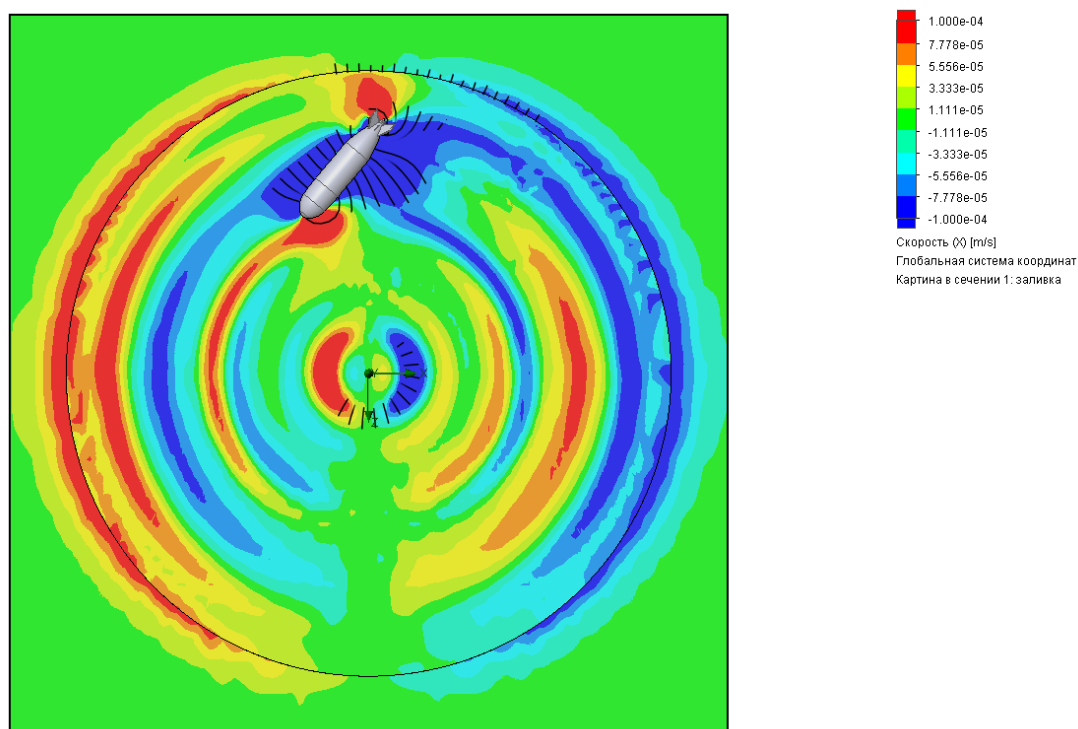


Рис. 28. Распределение скоростей под углом 50 градусов, момент вращения –  
73.31 Н\*м

Результатом данных расчётов является уменьшение линейной скорости при движении по прямой на 0.18 м/с относительно угла 45 градусов, что является снижением на 2%. При поворотном же движении заметен прирост в значении момента вращения на 11.53 Н\*м, что является улучшением манёвренности на 16%. Учитывая все эти изменения, можно сделать вывод, что уменьшение скорости с лихвой компенсируется приростом в значении вращательного момента, а следовательно и манёвренности аппарата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено построение трёхмерной геометрической модели подводного аппарата, для чего был найден реально существующий прототип с известными габаритными размерами и возможностью получения информации о мощности двигателей, которым выступил автономный необитаемый подводный аппарат «Витязь Д», разработанный Центральным Конструкторским Бюро Морской Техники «Рубин». Для уже построенной геометрии, представляющей собой торпедовидную форму, произведён подбор характеристик и построение винтов, которые являются неотъемлемой частью двигательного комплекса, состоящего из четырёх двигателей, расположенных под углом к продольной оси корпуса. После построения всех составляющих частей подводного аппарата было проведено моделирование прямолинейного движения методом виртуальной продувки, а также поворота вокруг вертикальной оси посредством имитации движения на ротативной установке в добавлении Flow Simulation CAD-пакета для трёхмерного моделирования SolidWorks. Моделирование данных видов движения проводилось с целью вычисления угла наклона двигателей АНПА, который будет являться оптимальным для каждого из видов движения, то есть подводный аппарат должен одновременно развивать высокую скорость при прямолинейном движении и быть управляемым на поворотах. Соблюдение данных условий движения необходимы аппарату для выполнения его основных функций, а именно сбора информации о рельефе дна, строении верхнего слоя осадков, наличии на дне предметов и препятствий.

Результатом данного моделирования стал подбор оптимального угла для данного аппарата, являющийся углом 50 градусов, который позволяет модели развивать скорость 10.34 м/с и вращающий момент 73.31 Н\*м. При учёте всех погрешностей построения модели движения и недостаточной проработки отдельных элементов на корпусе, а также внутри корпуса можно сделать вывод о том, что полученные данные сравнимы с реальными.

Таким образом, при сравнении с реально существующим и показавшем себя в условиях погружения прототипом, движители которого направлены под углом 45 к продольной оси, можно увидеть, что при данном моделировании было получено снижение значения скорости на 2%, что незначительно по сравнению с увеличением вращательного момента на 16%. Данные результаты после дополнительной проработки модели и испытаний в лабораторных, а также реальных условиях могут помочь в более продуктивных исследованиях водных пространств, что ускорит исследование мирового океана, который до сих пор скрывает от человечества свою огромную неизведанную часть.

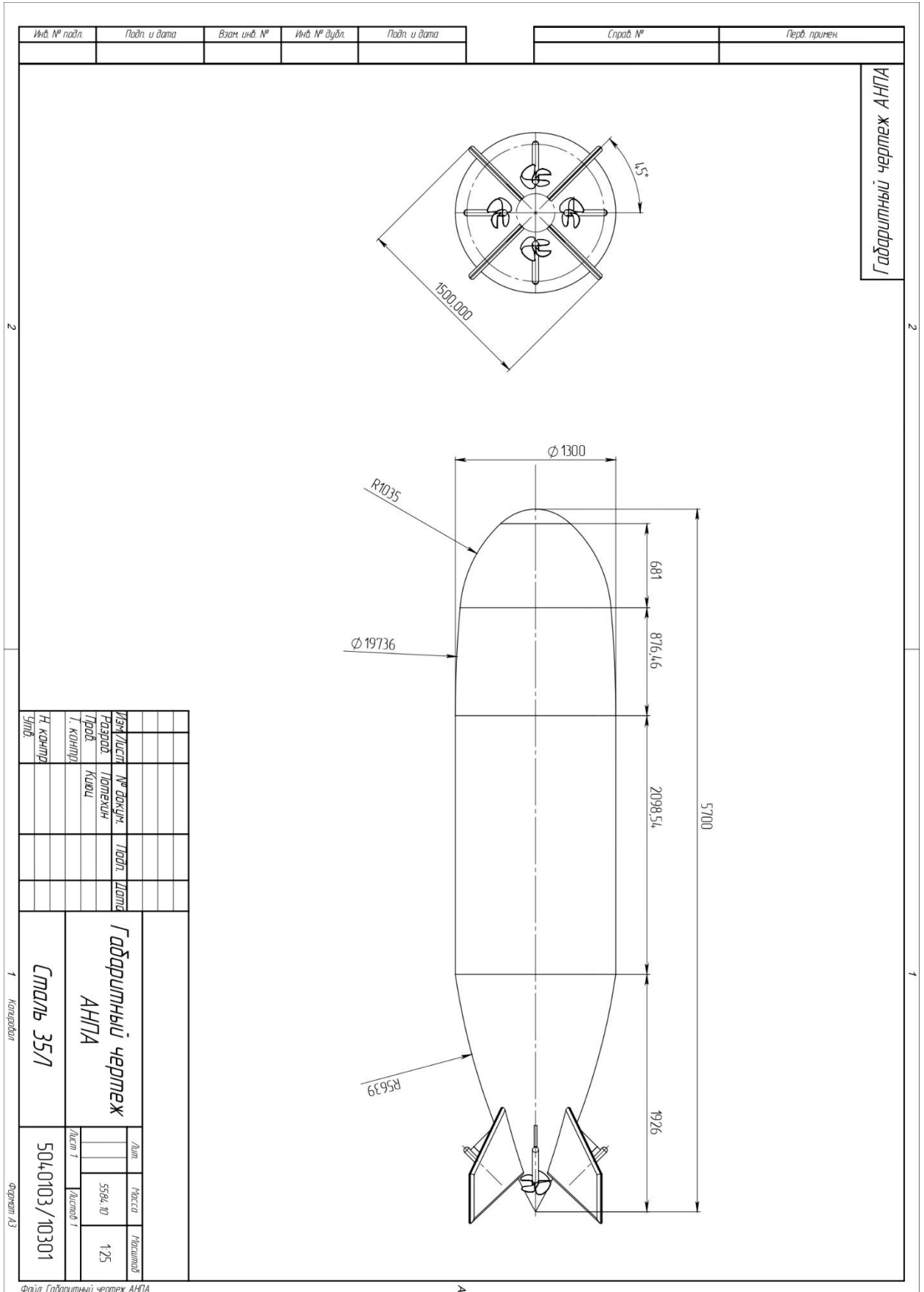
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
2. Алямовский А. А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс. – 2010.
3. Бавин В. Ф., Завадовский Н. Ю., Левковский Ю. Л., Мишкевич В. Г. Гребные винты. Современные методы расчёта. – Л.: Судостроение. – 1983.
4. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М. и др. Использование гидролокатора бокового обзора для отслеживания подводных кабелей и трубопроводов с помощью автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф. «Перспективные системы и задачи управления». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 379–380.
5. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М. и др. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1(11). С. 17–23.
6. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. В трёх томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. – Л.: Судостроение. – 1985.
7. Горячев А.М. Устройство и основы теории морских судов. / А. М. Горячев, Е. М. Подругин – Судостроение, 1983.
8. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение; [отв.ред. Киселев Л.В.]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. – Владивосток, 2018.
9. Alexander Phillips, Maaten Furlong, Stephen R Turnock. The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle. Nutts – 2007.



10. Bo Yang, Sami Kaidi, Emmanuel Lefrançois. CFD Method to Study Hydrodynamics Forces Acting on Ship Navigating in Confined Curved Channels with Current. *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022.
11. Erik Lind, Magnus Meijer. *Simulation and Control of Submarines*. Department of Automatic Control, 2014.
12. Inzartsev A.V., Pavin A.M. AUV Behavior Algorithm While Inspecting of Partly Visible Pipeline // *Proceeding of OCEANS'06 MTS/IEEE*. Boston, 2006. ISBN 1-4244-0115-1.
13. Jeong-Hoon Park, Myung-Sub Shin, Yun-Ho Jeon, Yeon-Gyu Kim. Simulation-Based Prediction of Steady Turning Ability of a Symmetrical Underwater Vehicle Considering Interactions Between Yaw Rate and Drift/Rudder Angle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. – 2021.
14. Jiafeng Huang. *Design and Motion Simulation of an Underwater Glider in the Vertical Plane*. MDPI, 2021.
15. Kunyu Han, Xide Cheng, Zuyuan Liu, Chenran Huang, Haichao Chang, Jianxi Yao, Kangli Tan. Six-DOF CFD Simulations of Underwater Vehicle Operating Underwater Turning Maneuvers. *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021.
16. Sebastian Thune. *Simulation of Submarine Manoeuvring*. Royal Institute of Technology Sweden, 2015.
17. Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин»: [https://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/kompleks\\_vitjaz\\_d/](https://ckb-rubin.ru/proekty/robototekhnika/kompleks_vitjaz_d/)

# Приложение 1. Габаритный чертёж АНПА



## Приложение 2. Теоретический чертёж винта

