

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані
технології та системи навігації і керування»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Моделювання динаміки підводного автономного апарату»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-71

Величко Сергій Миколайович _____

Керівник:

завідувач кафедри ПСОН, д.т.н., професор

Бурау Н. І. _____

Рецензент:

асистент Драчук О. О. _____

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма - Комп'ютерно - інтегровані технології та системи навігації і керування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Величку Сергію Миколайовичу

1. Тема роботи «Моделювання динаміки підводного автономного апарату»,

керівник роботи Бурау Надія Іванівна, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 8 червня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: 4 моделі з геометричними розмірами 1000 мм довжина, діаметр моделей 1, 2 – 300 мм радіус скруглення 291.75 мм, для моделей 2,4 діаметр 240 мм, радіус скруглення 500 мм. Швидкість руху в морській воді: 5 морських вузлів, 4 морських вузла по осі X та по осі Z та швидкість в декартових координатах 7 по осі X, 0.001 - Y та 0.7 – Z морських вузлів. Середньо статичний тиск на виході встановити 0 Па.

4. Зміст роботи, Вступ, огляд безпілотних підводних апаратів; моделювання безпілотного підводного апарату (з різними геометричними формами за відсутності та наявності додаткових елементів конструкції); моделювання та аналіз динамічних характеристик (розподілу швидкостей, тиску, турбулентності) розроблених моделей підводних апаратів для різних характеру та параметрів потоку; висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) презентація

6. Консультанти розділів роботи*

	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 3 квітня 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд і аналіз літератури	21.04.2021 р.	
2.	Огляд телекерованих безпілотних підводних апаратів	05.05.2021 р.	
3.	Огляд автономних безпілотних підводних апаратів	12.05.2021 р.	
4.	Моделювання в CAD системі Solidworks	19.05.2021 р.	
6.	Проведення досліджень в CAE системі Ansys Workbench	26.05.2021 р.	
7.	Оформлення презентації	07.06.2021 р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка до захисту	08.06.2021 р.	

Студент

Сергій ВЕЛИЧКО

Керівник

Надія БУРАУ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

Анотація

Актуальність теми: використання безпілотного підводного апарату для виконання роботи дозволить зменшити витрати та людські ресурси при проведенні науково-дослідницьких, пошукових, військових та цивільних задач.

Структура та обсяг роботи: робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, додатку, 59 рисунків та 4 таблиць, списку використаної літератури з 20 позицій. Обсяг роботи складається з 74 сторінок.

Мета та завдання роботи: проведення моделювання обтікання автономного безпілотного підводного апарату (АБПА) при різних початкових швидкостях руху апарату.

Об'єктом дослідження виступає 3D модель АБПА за типом «глайдер» з різними геометричними розмірами та за/без наявності додаткових елементів.

Ключові слова: безпілотний підводний апарат; автономний безпілотний підводний апарат; моделювання.

Abstract

Relevance of the topic: the use of unmanned submarines to perform the work will reduce costs and human resources in research, search, military and civilian tasks.

Structure and scope of work: the work consists of an introduction, three sections, conclusions, appendix, 59 figures and 4 tables, a list of references from 20 positions. The volume of work consists of 74 pages.

Purpose and objectives: modeling of flowing around of autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV) at different initial velocities of the vehicle.

The object of the study is a 3D model of AUUV type "glider" with different geometric dimensions and with / without additional elements.

Keywords: unmanned underwater vehicle; autonomous unmanned underwater vehicle; modeling.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД БЕЗПІЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ	10
1.1 Безпілотні підводні апарати	10
1.1.1 Класифікація безпілотних підводних апаратів.....	10
1.1.2 Функціональні можливості безпілотних підводних апаратів .	11
1.2 Телекеровані безпілотні підводні апарати.....	13
1.2.1 Класифікація та призначення телекерованого безпілотного підводного апарату	13
1.2.2 Режими використання телекерованого безпілотного підводного апарату	14
1.2.3 Комплектація телекерованих безпілотних підводних апаратів	15
1.2.4 Типові завдання, які можуть бути виконані телекерованим безпілотним підводним апаратом	15
1.3 Огляд телекерованого безпілотного підводного апарату «Фалкон 1000»	16
1.4 Автономні підводні безпілотні апарати.....	19
1.4.1 Класифікація автономних безпілотних підводних апаратів за формою конструкцій корпусу.....	19
1.4.2 Переваги автономних безпілотними підводними апаратами .	20
1.4.3 Завдання, які можуть бути виконані автономними безпілотними підводними апаратами.....	20
1.4.4 Динаміка розвитку АБПА.....	21
1.5 Системи управління автономного безпілотного підводного апарату	22
1.5.1 Математична модель АБПА	23
1.5.2 Розробка алгоритмів та законів керування	24
1.5.3 Програмно-апаратна реалізація.....	25
1.5.4 Тренувальний комплекс для відпрацювання технологій управління	26
1.6 Огляд раніше виконаних робіт.....	27

РОЗДІЛ 2	МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО АПАРАТУ	29
2.1	Огляд основних етапів та побудова моделей АБПА в програмному комплексі SolidWorks.....	29
2.2	Побудова моделі для аналізу в Ansys Fluid CFX	35
2.3	Створення креслення на основі 3D моделі	37
2.4	Додаткові пакети які можна було б використати для аналізу моделі	38
	Висновки до розділу 2.....	40
РОЗДІЛ 3	ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	41
3.1	Налаштування модуля Fluid Flow (CFX) та проведення розрахунків	41
3.1.1	Генерація сітки.....	41
3.1.2	Задання граничних умов та додавання нового матеріалу	43
3.2	Відображення результатів та їх інтерпретація	48
3.3	Рекомендації щодо подальшого моделювання	56
	Висновки до розділу 3.....	57
	ВИСНОВКИ.....	58
	Список використаної літератури	60
	Додатки	63
	Додаток А	63

Перелік умовних скорочень

АБПА	- автономний безпілотний підводний апарат;
БЛА	- безпілотний літальний апарат;
БПА	- безпілотний підводний апарат;
ПА	- підводний апарат;
СПУ	- спуско-підйомний пристрій;
СУ	- система управління;
ТБПА	- телекерований безпілотний підводний апарат;
ТПА	- телекерований підводний апарат;
УВП	- універсальний вантажний привід.

ВСТУП

Використання безпілотних підводних апаратів (БПА) є невід'ємною частиною для дослідження водного середовища, виконання поставлених завдань, де людині перебувати небезпечно.

В поточний момент, активно використовуються два типи: автономний безпілотний підводний апарат (АБПА) та телекерований безпілотний підводний апарат (ТБПА). АБПА має більшу перевагу над ТБПА, оскільки може володіти автономним живленням та автономною системою керування без втручання оператора, по цій причині вони більше користуються попитом. Для успішного виконання завдань АБПА має володіти високою швидкістю, гарною динамікою та мобільністю.

В провідних морських країнах апарати вже використовуються для різноманітніших цілей та постійно працюють над покращенням характеристик. Вже неодноразово було доведено доцільність використання БПА в таких задачах як знешкодження мін, контроль території, дослідження морського середовища, картографування районів катастроф та інше. Україна так само являється морською державою і потребує використання даних апаратів, тема з кожним роком стає все більш актуальною для досліджень та проведення власних розробок.

Об'єктом дослідження буде виступати 3D модель, яка матиме форму «глайдер».

Мета та завдання бакалаврської дипломної роботи, це проведення моделювання динаміки автономного безпілотного підводного апарату різних геометричних форм при різних швидкостях.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД БЕЗПІЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

1.1 Безпілотні підводні апарати

Щороку в світі проводиться сотні змін і відкриття різних приладів, роботів або інших систем автоматизації. Вже складно уявити світ без використання дронів в повітрі, які проводять операції у військовій області, наприклад розвідка або ж доставка вантажів, які можуть бути небезпечними для людей. У цивільній сфері безпілотні літальні апарати (БЛА) також себе зарекомендували, можуть проводити дослідження об'єктів з повітря, ретранслювати повідомлення і багато інших функцій.

Після створення БЛА виникла необхідність розробки безпілотного підводного апарату (БПА) для дослідження підводного світу. В останні десятки років в країнах, які займають лідируючі позиції в області морських технологій було створено понад 9 тисяч різних БПА для вирішення прикладних завдань і наукового дослідження глибин океану. Уже після створення перших прототипів і їх випробувань було зрозуміло, що необхідно продовжувати розробки та вдосконалювати дані апарати. У поточний момент, БПА вже продемонстрували свою ефективність при виконанні аварійно-рятувальних, оглядово-пошукових та інших видів робіт.

1.1.1 Класифікація безпілотних підводних апаратів

На сьогоднішній день, існує велика кількість БПА з різними типами живлення, способом управління, переміщення у воді, цільовим призначенням, масогабаритними характеристиками [1].

За цільовим призначенням їх поділяють на такі типи [1]:

- військові;
- цивільні;
- експериментальні;

- багатоцільові (подвійного застосування);

Практично всі конструкції в сучасній розробці є багатоцільовими.

За типом живлення БПА ділять на наступні типи [1]:

- телекеровані, харчування подається безпосередньо з корабля;
- автономні, мають власний елемент живлення;
- напівавтономні.

Спосіб управління безпілотним підводним апаратом може бути: дистанційним, управління проводиться оператором, може бути застосовано для ТБПА, або ж автоматичним, відповідно до внесеного алгоритму - АБПА.

За масогабаритними характеристиками БПА поділяються на такі типи [1]:

Телекеровані безпілотні підводні апарати [1]:

- мікро, маса становить менше 5 кілограм;
- міні - від 5 до 30 кілограм;
- легкі - від 30 до 100 кілограм;
- середні - від 100 до 2000 кілограм;
- важкі - від 2000 кілограм.

Автономні безпілотні підводні апарати [2]:

- легкі (переносні), маса до 45 кілограм;
- малогабаритні - від 46 до 230 кілограм;
- середні - від 231 до 1400 кілограм;
- великі - від 1400 до 10000 кілограм.

За способом переміщення у воді БПА діляться на наступні типи [1]:

- дрейфуючі, рух відбувається під впливом течії;
- самохідні, мають власний двигун;
- ґрунтові, переміщаються по ґрунті;
- буксуючі, рухаються згідно траєкторії судна-носія.

1.1.2 Функціональні можливості безпілотних підводних апаратів

Залежно від типу БПА, цільових і масогабаритних характеристик, можуть бути виконані наступні задачі [3]:

- оглядово-пошукові роботи: інспекція підводних споруд і комунікацій, пошук і обстеження затонулих об'єктів.
- геологорозвідувальні роботи: топографічна, фото- і відеозйомка морського дна, акустичне профілювання, картографування рельєфу.
- підлітні роботи: обслуговування систем освітлення, прокладка кабелю і трубопроводів.
- океанографічні дослідження.
- екологічний моніторинг.
- роботи військового призначення: патрулювання, протимінна оборона.

В даний момент, ТБПА використовується все рідше, такі апарати з'єднані з кораблем-носієм спеціальним кабелем, по якому передається живлення і передача / прийом інформації. Дані апарати мають ряд серйозних недоліків, основний з них це залежність глибини занурення і дальність руху від довжини кабелю. Їх основним завданням можна вважати проведення аварійних та рятувальних робіт, прокладка труб газу / нафтопроводу, коли необхідно оперативне управління виходячи з ситуації.

Оскільки безліч завдань вимагає різної глибини занурення і довжини переміщення було прийнято рішення про створення АБПА, який має автономне живлення і автоматично виконує поставлені перед ним завдання, які були закладені в його алгоритм. Незважаючи на досить «розумний» пристрій дистанційного керування також вбудовано і при необхідності оператор може ставити завдання для виконання [1].

Незважаючи на те, що АБПА є автономними як в плані енергоспоживання, так і в управлінні, ще широко використовуються апарати, які є автономними тільки в плані управління, а живлення передається через спеціальний кабель або навпаки харчування автономне і управління здійснюється оператором по кабелю. Ще існують БПА, які працюють в напіваавтоматичному режимі, оператор ставить завдання для виконання, а

системи управління виконують її в автоматичному режимі з урахуванням зовнішніх факторів [1].

1.2 Телекеровані безпілотні підводні апарати

Телекерований безпілотний підводний апарат (ТБПА) - апарат, оснащений спеціальним обладнанням, занурюваний в воду і керований з поверхні пілотом або групою операторів (пілот, навігатор і ін.). Підводне обстеження за допомогою ТБПА дозволяє отримати об'єктивну візуальну інформацію про стан підводних об'єктів в режимі реального часу з можливістю запису з метою подальшого детального аналізу [4].

1.2.1 Класифікація та призначення телекерованого безпілотного підводного апарату

Залежно від розміру і завдань, які виконуються ТБПА поділяються на такі типи [5]:

- малогабаритні;
- ТБПА легкого класу;
- робочі ТБПА легкого класу;
- робочі ТБПА важкого класу.

Малогабаритні ТБПА - в основному виконують завдання по обстеженню підводних об'єктів. Завдяки своїм малим розмірам можуть перевозитися в легкових автомобілях, використовуватися в умовах обмеженого простору, наприклад, всередині трубопроводів. Для експлуатації апарату достатньо однієї людини [5].

Основною метою використання даного типу є пошукові та оглядові роботи. Завдяки малим масогабаритні характеристики апарат може проводити роботи у вузьких проходах.

ТБПА легкого класу - на відміну від малогабаритних ТБПА, є більш потужними і габаритними. Призначені для повномасштабних підводних досліджень, так як можуть нести на собі більше додаткового обладнання для виконання більш широкого спектру завдань і піднімати предмети невеликої ваги [5].

Особливістю даного типу є можливість проведення ускладнених пошукових і обережних робіт, перенесення невеликих об'єктів, незначні роботи на трубопроводах.

Робочі ТБПА легкого класу - відносно невеликі потужні робочі апарати з маніпуляторними і інструментальними комплексами, які, крім завдань пошуку і обстеження підводних об'єктів, здатні виконувати і підводно-технічні роботи на підводних об'єктах (платформи, трубопроводи). Типовими завданнями для цього класу є підтримка буріння і легкого будівництва, дослідження труб і інша спільна робота [5].

Робочі ТБПА важкого класу - відрізняються від робочих ТБПА легкого класу, тим, що можуть виконувати складні підводні роботи на сильних течіях. Використовуються для глибоководних операцій - підводні стикувальні операції на глибоководних установках, перевезення великих вантажів [5].

1.2.2 Режими використання телекерованого безпілотного підводного апарату

Існує всього два основних режими управління:

- «Плаваючий» режим. Застосовується при роботах на невеликих глибинах: до 300 м для підводних апаратів пошуково-обслідувальний групи і до 1000 м для підводних апаратів робочої групи. Спуск апарату за борт судна здійснюється за допомогою штатного спуско-підйомного пристрою (СПУ) судна. Управління ТПА здійснюється з пульта управління, розміщеного в спеціальному приміщенні судна, або в посту управління контейнерного типу, що поставляється компанією-виробником [5].

- Режим роботи з пристроєм глибоководного занурення (УВП). Застосовується при роботі на великих глибинах. УВП представляє собою спеціальний контейнер, в якому ТПА опускається на робочу глибину. Спуск апарату за борт судна здійснюється за допомогою спеціального СПУ, що входить в комплект ТПА. Управління роботою ТПА і УВП здійснюється з кабіни управління чи спеціально обладнаного поста керування судна-носія [5].

1.2.3 Комплектація телекерованих безпілотних підводних апаратів

Залежно від виконуваної роботи, може бути використане наступне навісне обладнання [5]:

- відеокамери з підвищеною світлочутливістю, HD-камери (в тому числі з функцією масштабування);
- гідролокатор кругового огляду, гідролокатор бокового огляду, профілограф, багатопроменевий ехолот;
- гідроакустична система позиціонування;
- ультразвукової товщинометрії або дефектоскоп;
- магнітометр;
- лазерна лінійка;
- система виявлення витоків нафти;
- маніпулятори з різним числом ступенів свободи;
- спеціальне обладнання і датчики.

1.2.4 Типові завдання, які можуть бути виконані телекерованим безпілотним підводним апаратом

ТБПА можуть виконувати такі типові завдання [6]:

- Пошук і знаходження об'єктів під водою, як візуально, так і за допомогою спеціалізованого пошукового обладнання;
- Підняття на поверхню знайдених об'єктів, в тому числі бортових самописців літальних апаратів;

- Проведення підводних інспекцій за допомогою спеціалізованого обладнання;
- Маркування місцевості, де були знайдені об'єкти, за допомогою гідроакустичних маяків;
- Огляд і документування стану підводних будівель і устаткування, знайдених затонулих об'єктів.

1.3 Огляд телекерованого безпілотногo підводного апарату «Фалкон 1000»

ТБПА «Фалкон 1000» є найпопулярнішим в лінійці апаратів легкого класу. Зарекомендований як надійний та багатофункціональний інструмент для пошукових та оглядових робіт в прибережних морських і внутрішніх водах[7], переглянути зовнішній вигляд апарату можна на рис.1.1.



**Рис. 1.1 Зовнішній вигляд ТБПА
"Фалкон 1000"**

Основним призначенням даного апарату являється виконання пошукових (допошукових) і обстежувальних робіт в прибережних морських або внутрішніх водах. Виконання завдань можуть проводитись на глибині до

1000 метрів, як у вузьких тунельних проходах так і на відкритому морському просторі[7].

Побудова підводного апарату на несучій рамі з поліпропілену, а також застосування сучасної елементної бази дозволяють значно зменшити масогабаритні показники системи ПА. Спуск і підйом підводного апарату можуть здійснюватися вручну без застосування спеціального спуско-підйомного пристрою. Завдяки оригінальному технічному рішенню побудови системи управління і малому моменту інерції рушіїв забезпечується висока точність і швидкість відпрацювання рушіями сигналів управління (зміни швидкості обертання, реверс). Для зв'язку підводного апарату і надводного модуля застосовується тонкий і гнучкий кабель-трос з низьким гідродинамічним опором і близькою до нульової плавучості[8].

Пульт містить всі необхідні елементи для керування швидкістю, глибиною і курсом підводного апарату. Включає в себе джойстик з трьома ступенями свободи, ручку управління нахилом відеокамери, ручку управління потужністю світильників, кнопки включення автофункцій. Автофункції забезпечують утримання постійного курсу апарату і заданої глибини занурення. Надводний модуль містить спеціальне програмне забезпечення для контролю і управління підводним апаратом. Система має високу надійність, малим енергоспоживанням. Архітектура апарату дозволяє здійснювати установку широкого спектру додаткового обладнання [8].

В основну комплектацію даного ТБПА входить[7,8]:

- П'ять рушіїв (4 горизонтальних, 1 вертикальний);
- кольорова відеокамера (480 ТВЛ, 0,2 люкс) на похилій платформі із змінним кутом нахилу $\pm 90^\circ$ і зворотним зв'язком;
- два світлодіодних світильника;
- магнітний компас і вбудовані акселерометри (похибка $\pm 2^\circ$);
- автофункції (автокурси, автоглибина);
- стандартний надводний блок управління з монітором 15 ";

- надводний блок живлення;
- система накладення текстової інформації на відеозображення;
- свинцеві привантаження, 14 кг;
- одноступеневий маніпулятор з захватом;
- лебідка ручна механічна (опціонально: в мобільному виконанні).

Додаткове обладнання яке може бути застосовано з ТБПА «Фалкон 1000»[7,8]:

- гідроакустичні системи;
- відеокамери, фотокамери;
- світильники;
- інструментальна рама з гідравлічним маніпулятором з п'ятьма ступенями свободи;
- інструментальна рама з гідравлічним тросорізом;
- інструментальна рама для установки океанографічного обладнання;
- лебідка електрична;
- датчик катодного потенціалу;
- ультразвуковий товщиномір;
- лазерний вимірювач відстаней;
- машинка зачисна;
- датчики параметрів водного середовища;
- надводний модуль, виконаний за стандартом IP68 (водонепроникний корпус);
- пульт ручного керування у виконанні за стандартом IP68 (водонепроникний корпус);
- спуско-підйомний пристрій.

Низьке енергоспоживання ТБПА дозволяє житися від звичайної однофазної мережі змінного струму (110-270В, 50/60 Гц, 3,0 кВт). Живлення ПА проводиться через кабель-трос та не вимагає від персоналу особливих навичок з обслуговування електротехнічних виробів [7,8].

Більш детально ознайомитись з масогабаритними та технічними характеристиками можливо за посиланнями [7,8].

1.4 Автономні підводні безпілотні апарати

Автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) - це програмовані адаптивні системи, що мають переваги перед телекерованими підводними апаратами. Основними їх перевагами є відсутність функціональної залежності від забезпечуючого судна-носія, велика зона покриття, швидкість виконання огляду, збір даних в безпосередній близькості до об'єкту дослідження [9].

1.4.1 Класифікація автономних безпілотних підводних апаратів за формою конструкцій корпусу

За виглядом конструкції АБПА можна розділити на наступні типи [1,10]:

1. апарати з класичними гідродинамічними формами: циліндричною, торпедоподібною, сигароподібною, каплеподібною, плоскою, комбінованою.
2. апарати з плоскою верхньою частиною корпусу;
3. апарати планетарної форми (глайдер), система руху яких ґрунтується на зміні власної (залишкової) плавучості. Основними відмінностями апаратів- планерів є значна дальність переміщення та автономність. Апарати оснащені бортовими інформаційно-вимірювальними комплексами для опрацювання та передачі даних гідроакустичним каналом або повітряно-космічним [10];
4. апарати з біонічними формами плавучого та повзучого типів або такі, що створені з використанням біонічних принципів. Типовими завданнями для виконання можуть бути пошукові та/ або оглядові роботи, збір інформації з автономних донних станцій, виявлення мін на мілководді, проведення аварійно-рятувальних робіт[10].

Зовнішній вигляд апаратів за типом конструкції відображено на рис. 1.2

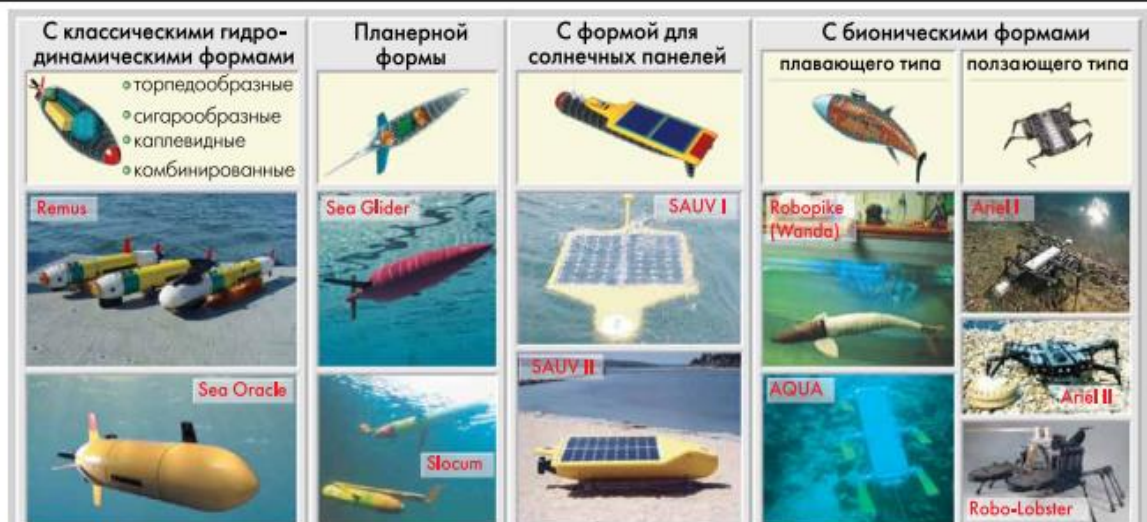


Рис. 1.2 Умовна класифікація АБПА за типом конструкції

1.4.2 Переваги автономних безпілотними підводними апаратами

Основними перевагами АБПА серед інших є [11]:

- відсутність кабель-тросового зв'язку з судном-носієм і відповідно визначених ним недоліків;
- висока мобільність;
- скритність функціонування;
- здатність проводити роботи, в місцях недоступних для інших типів.

З вищевказаних переваг, можна зробити висновки, що підтримування та використання АБПА є більш економічним в порівнянні з ТБПА, оскільки відсутній кабель для живлення та/або передачі інформації/ живлення, не потребує спеціальних спуско-підйомних пристроїв та судно-носіїв.

1.4.3 Завдання, які можуть бути виконані автономними безпілотними підводними апаратами

Автономні безпілотні підводні апарати, з кожним роком починають виконувати ще більше завдань, однак, основні з них залишаються [11]:

- ✓ пошук корисних копалин на великій глибині та попереднє визначення їх хімічного складу геологічних утворень;

- ✓ виконання спеціальних задач військового призначення, таких як розвідка, протичовнова і протимінна боротьба, диверсійні акції, стеження;
- ✓ огляд та обслуговування підводних кабельних ліній та інших підводних споруд;
- ✓ робота в агресивному середовищі;
- ✓ тривале маневрування за заданою програмою в водному просторі з одночасним проведенням різноманітних океанологічних, гідрофізичних, гідрографічних і біологічних досліджень;
- ✓ обстеження нижньої кромки крижаних полів, оцінки товщини і характеру крижаного покриву, підлідна гідрологія;
- ✓ пошук та ідентифікація об'єктів із заздалегідь заданими властивостями.

Основна частина робіт проводиться на глибинах до 1000 м. Тільки близько 30% АБПА мають робочу глибину занурення понад 1000 м, решта - робочу глибину менше 1000 м; глибоководних АБПА (з робочою глибиною 6000 м і більше) – одиниці [11].

1.4.4 Динаміка розвитку АБПА

Однозначно оцінювати динаміку розвитку та основні характеристики не є раціональним оцінювати.

В поточний момент, рівень техніки та технології, не дозволяють реалізувати всі потенційні можливості даного класу. Мала автономність, через низький запас енергоємності, слабо розвинена система маніпуляторів, низький рівень використання штучного інтелекту в системах управління [11].

На четвертому міжнародному симпозіумі з проблем розвитку АБПА, що відбувся в червні 1985 р, вперше були сформульовані основні технічні вимоги до АБПА 21 століття. Намітилася тенденція освіти міжнародних консорціумів в забезпечення розвитку перспективних АБПА з дотриманням загальної концепції їх створення [11].

АБПА 21 століття представляються закордонним фахівцям як апарати, що володіють [11]:

- великою автономністю (до 200 ч);
- розвиненою системою маніпуляторів;
- високоорганізованої «інтелектуальної» системою управління (СУ), що реалізує такі функції, як розпізнавання образів, прийняття рішень в умовах часткової і повної невизначеності, адаптація до зовнішніх впливів.

В області створення АБПА взаємодіє велика кількість різних фірм, тільки в США задіяні понад 36, об'єднаних під егідою МО через ВМС і управління DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), а в Японії - понад 250 фірм. До числа досягнень з відпрацювання технологій створення перспективних АБПА можна віднести ПА UUV, XP-21 Sea Squirt (США), DOLPHIN, DOGGIE (Великобританія), RTV-KAM (Японія), ARUS (Європейський консорціум) [11].

Система управління АБПА повинна мати функції самонавчання, прийняття рішення по маневруванню, розпізнавання гідроакустичних образів [11].

1.5 Системи управління автономного безпілотної підводного апарату

Для коректної роботи будь-якого роботизованого пристрою необхідно правильно створити математичну модель, за якою буде відбуватися його руху. Так як АБПА працюють на великій глибині допущена помилка може вплинути на його роботу та життя в цілому. При розробці АБПА є певний алгоритм дій для отримання бажаного результату [12]:

1. побудова математичної моделі;
2. розробка законів та алгоритмів керування;
3. програмно-апаратна реалізація системи автоматичного управління.

1.5.1 Математична модель АБПА

Для створення математичної моделі слід враховувати АБПА як тіло, яке може здійснювати переміщення в водному середовищі. Для можливості отримання бажаної моделі необхідно враховувати закони гідродинаміки, опис руху тіла в в'язкому середовищі, яке створює опір руху тіла та активно, впливає на нього [12].

Можна виділити два режими управління які суттєво відрізняються за призначенням та особливостями [12]:

- маршовий рух по заданій траєкторії;
- маневрування, в першу чергу, занурення і спливання, а також подолання (обхід) перешкод.

В зв'язку з цим для першого режиму присутні наступні припущення, які складаються в наступному:

- плавучість АБПА не регулюється;
- Головні осі інерції АБПА збігаються з його осями симетрії;
- маса АБПА, положення центру мас і центру тиску в процесі штатних (безаварійний) переміщень не змінюються;
- при допустимих відстанях переміщеннях АБПА сферичністю Землі можна знехтувати, що обумовлює допустимість застосування Декартових систем координат;
- АБПА має постійну позитивну плавучість.

На етапі розробки математичної моделі можна отримати наступні результати [12]:

- гідродинамічні характеристики, тобто залежність гідродинамічних сил і моментів від кутів атаки і ковзання на різних швидкостях;
- системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку і кінематику АБПА;
- математичну модель виконавчих механізмів;
- аналіз керованості АБПА;

- оптимізація вигляду і форми елементів корпусу шляхом дискретних програмно-керованих деформацій з серією CFD-розрахунків для досягнення мінімуму цільової функції.

1.5.2 Розробка алгоритмів та законів керування

АБПА для виконання своїх завдань має самостійно виконувати переміщення в морському середовищі, занурюватись на різну глибину, відходити на різну відстань від берега, вибирати траєкторію руху та по завершенню виконання повертатись на «базу». Відповідно, даний апарат повинен бути забезпечений досить розвиненою інтелектуальною, автономною системою управління рухом.

Завдяки застосуванню позиційно-траєкторного підходу до управління АБПА і інтелектуальних методів планування траєкторії і визначення стратегії поведінки АБПА вдається досягти таких результатів [12]:

- розширення функціональних можливостей АБПА при русі вздовж складних просторових траєкторій з різними швидкостями при наявності стаціонарних і рухомих перешкод.
- підвищення точності систем керування АБПА, за допомогою використання нелінійних методів управління і нелінійного методу комплексування навігаційних даних.
- підвищення швидкодії АБПА за допомогою використання оптимальних за швидкістю систем управління.
- можливість функціонування в неформалізованих середовищах при наявності стаціонарних і рухомих перешкод при відсутності попереднього картографування.

Складність розробки інтелектуальної системи управління АБПА в тому, що немає точного порядку виконання завдань і рішення необхідно приймати виходячи з ситуації, що виникла в даний момент. Продумати всі можливі сценарії руху немає змоги, щоб закласти їх в алгоритм керування. По цій

причині, система, яка забезпечує вирішення задач планування дій є однією з найважливіших систем управління АБПА.

Основними завданнями, що визначають ефективне і безпечне функціонування АБПА є [12]:

- завдання планування траєкторії;
- завдання обходу перешкод.

При виборі алгоритму оцінювання враховуються такі критерії [12]:

- якість оцінювання;
- універсальність алгоритму;
- клас спостережуваних величин;
- кількість необхідної інформації.

1.5.3 Програмно-апаратна реалізація

Основним завданням СУ є здійснення управління в автоматичному режимі АБПА, забезпечення безпеки плавання АБПА, управління їх рухом з урахуванням попередження зіткнення з морськими об'єктами. Можна виділити наступні, загальні для всіх блоків СУ критерії [12]:

- надійність, що включає в себе безперебійне функціонування в заданих умовах експлуатації;
- точність виконання завдання;
- мінімальна маса і габарити.

Виходячи з цього, формуються вимоги апаратної реалізації блоків СУ АБПА [9]:

- змінюваність, що припускає можливість простої заміни вийшов з ладу блоку новим;
- використання максимально стандартизованих елементів при розробці блоків СУ;
- гнучкість, що передбачає наявність резервних ресурсів (обчислювальна потужність, канали введення / виводу, розширені можливості програмного інтерфейсу);

- компактне розташування різних електронних блоків в корпусі СУ АБПА.

1.5.4 Тренувальний комплекс для відпрацювання технологій управління

Програмні засоби моделювання дозволяють проводити імітаційні експерименти з АБПА та системою керування на основі вже існуючих математичних моделей та алгоритмів керування. Дані випробування мають описувати як сам АБПА з системою керування так і зовнішнє середовище.

Використання програмних засобів моделювання в ітераційному процесі конструювання системи управління АБПА має метою [12]:

- дослідження особливостей математичної моделі АБПА;
- верифікацію системи управління АБПА - перевірку відповідності її характеристик заданим, оцінку показників якості системи;
- уточнення використаних математичних моделей і алгоритмів управління;
- графічне відображення отриманих результатів.

При побудові програмного комплексу моделювання рухів АБПА вихідними даними є [12]:

- математична модель ;
- закон формування керуючих впливів;
- алгоритми планувальника переміщень;
- алгоритми оцінювання параметрів і збурень;
- дані про погрішності датчиків положення, швидкості, прискорення і т.д., моделі шумів в каналах вимірювання і управління;
- модель зовнішнього середовища.

Програмний комплекс моделювання реалізує наступні функції [12]:

- формування тестової місії;
- програмну реалізацію алгоритмів планування траєкторій АБПА;

- налаштування базового алгоритму управління для роботи в заданому режимі;
- розрахунок керуючих впливів на основі заданого закону управління;
- передачу обчислених керуючих впливів в модель АБПА і інтегрування математичної моделі;
- введення збурень, моделі середовища, похибок;
- програмну реалізацію алгоритмів оцінювання збурень;
- побудова графіків змінних стану АБПА, вироблених керуючих впливів і інших змінних;
- відображення тривимірної моделі руху;
- оцінку результатів чисельного моделювання: обчислювальної складності алгоритмів, реалізованих в системі управління, енергетичних параметрів, які повинен мати проєктований АБПА і ін.

Кінцевим результатом моделювання є прийняття рішення щодо доцільності використання математичної моделі, алгоритмів та структур.

1.6 Огляд раніше виконаних робіт

Як вже було розглянуто в підрозділі 1.5, одним з найважливіших моментів під час проєктування є складання математичної моделі руху. Даною сферою займаються науковці та провідні інститути для покращення характеристик.

Під час вивчення матеріалу для написання даної роботи було виявлено, що в даний момент, використовуються два типи підводних роботизованих систем:

1. БПА які мають основним завданням обслуговування підводних споруд (газо/нафтопроводи, бурові установки та інше). Для їх ефективного використання даний тип має володіти високою точністю при переміщеннях за різними траєкторіями.

2. БПА, які проводять академічні дослідження, застосовуються у військовій сфері та використовуються для пошуку у водному середовищі.

При розробці БПА дуже важливим фактором являється вибір алгоритму та закону керування, оскільки перевіряти кожну ідею шляхом складання та випробування в реальному житті доволі дорого всі рішення моделюються в спеціальних програмних комплексах та змінюючи вплив зовнішнього середовища, змінних відображається результат наближений до реального.

На жаль, врахувати всі фактори які можуть виникнути під час різних ситуацій немає змоги, по цій причині необхідно виділити основну частину роботи інтелектуальній системи управління (штучному інтелекту). В даний час, активно провідні компанії світу проводять інвестиції в навчання штучного інтелекту, розробки та покращення характеристик, вже зараз можна послухати класичну музику, яку від відтворює, однак до бажаного рівня ще далеко та всі переваги, які може містити АБПА розкрити ще не вдалось.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОГО БЕЗПЛОТНОГО АПАРАТУ

2.1 Огляд основних етапів та побудова моделей АБПА в програмному комплексі SolidWorks

Solidworks - програмний комплекс САПР призначений для автоматизації етапів підготовки виробництва. Основним завданням Solidworks є робота з 3D моделями [13].

Побудова будь-якої моделі починається з визначення ескізу в двовимірному просторі, провести його побудову можливо в одній із трьох запропонованих площин (Front Plane XY, Top Plane XZ & Right Plane YZ), оскільки моделі, що розглядаються не мають складних геометричних форм та створюються лише для можливості подальшого аналізу вибрати можна будь-яку, однак в роботі буде використовуватись Front Plane (XY). Для побудови ескізу знадобилось лише 5 базових інструментів (Line, Centerline, Tangent Arc, Trim Entities & Smart Dimension) з вкладки Sketch, які не мають складних налаштувань та інтуїтивно зрозумілі, по цій причині детально розписані не будуть. При необхідності ознайомитись з ними та іншими інструментами можна ознайомитись на офіційному сайті SolidWorks [14].

Методика побудови буде використана наступна:

- 1) будується ескіз верхньої або нижньої частини АБПА;
- 2) проводиться лінія додаткової геометрії навколо якої буде відбуватись побудова моделі;
- 3) визначається модель, вказуючи всі необхідно розміри;
- 4) проводиться побудова 3D моделі використовуючи інструмент «Revolved Boss/Base»;

Для моделей №2 та №4 виконуються також наступні кроки:

- 5) створюється додаткова площина;
- 6) в додатковій площині проводиться побудова ескізу крила;
- 7) задаються геометричні розміри;
- 8) проводиться побудова крила використовуючи інструмент «Extruded Boss/Base»;
- 9) використовуючи інструмент круговий масив задається кількість в 4 одиниці навколо циліндра по колу з радіусом 360 градусів.

В рамках завдання необхідно провести аналіз для 4 моделей з різними геометричними формами, на основі ескізу створюється 2 моделі з різними параметрами і після цього, на різній відстані та з різними геометричними формами додаються крильця для стабілізації руху.

Побудова буде проводитись тіла за типом малогабаритних БПА з масовими характеристиками до 230 кг; діаметром корпусу від 230 мм до 324 мм згідно таблиці, що надається в посиланні [2], також основні розміри наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Основні розміри моделей

	Модель №1	Модель №2	Модель №3	Модель №4
Довжина	1000 мм	1000 мм	1000 мм	1000 мм
Діаметр	300 мм	300 мм	240 мм	240 мм
Радіус скруглення	291.75 мм	291.7 мм	500 мм	500 мм
Довжина крила	-	100 мм	-	100 мм

Розглянувши методику та основні розміри, які були обрані згідно [2] та відображені в табл.2.1, було проведено побудову ескізів моделей №1 та №3, що відображені на рис. 2.1 і рис. 2.2

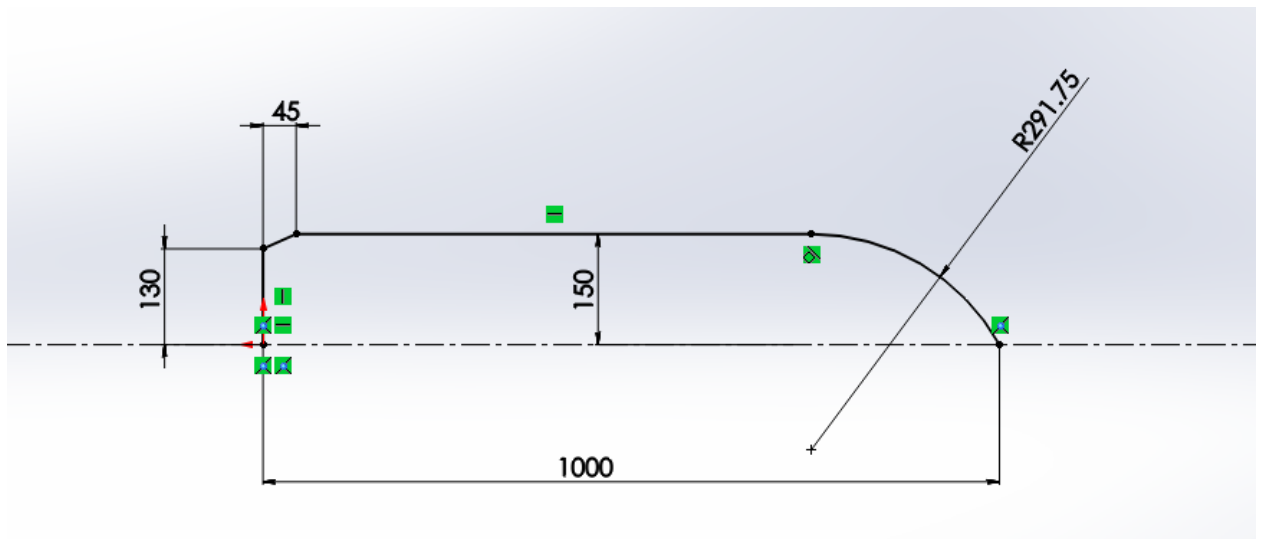


Рис. 2.1 Ескіз моделі №1

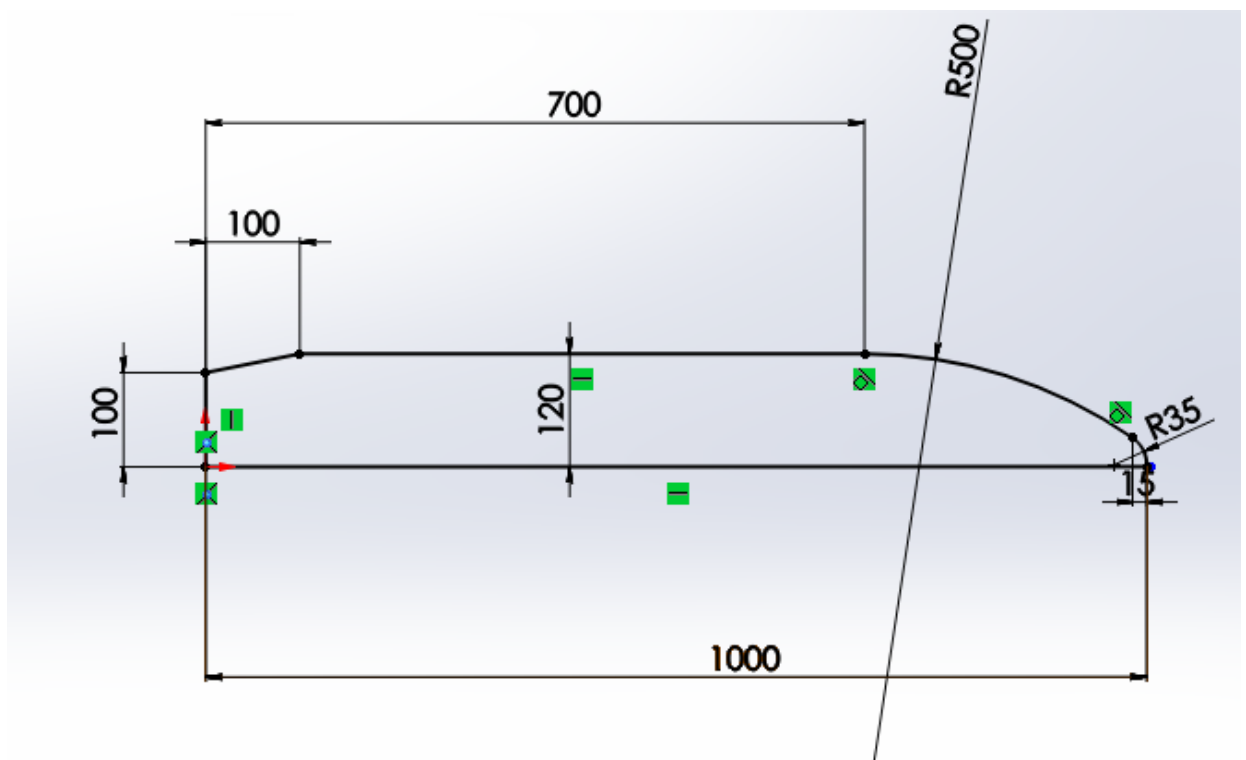


Рис. 2.2 Ескіз моделі №3

Як тільки ескізи повністю визначені, можна переходити до побудови 3D моделі і для цього необхідно скористатись інструментом «Revolved Boss/Base», який наданий у вкладці Features. Меню налаштувань так само є досить простим для розуміння: у полі «Axis of Revolution» необхідно обрати навколо якої осі бажаємо повернути ескіз та для нашої задачі використати в

групі «Direction 1» з випадального списку «Blind» та встановити кут повороту 360° і зберігаємо зміни. 3D моделі №1 та №3 відображені на рис.2.3 та рис.2.4.

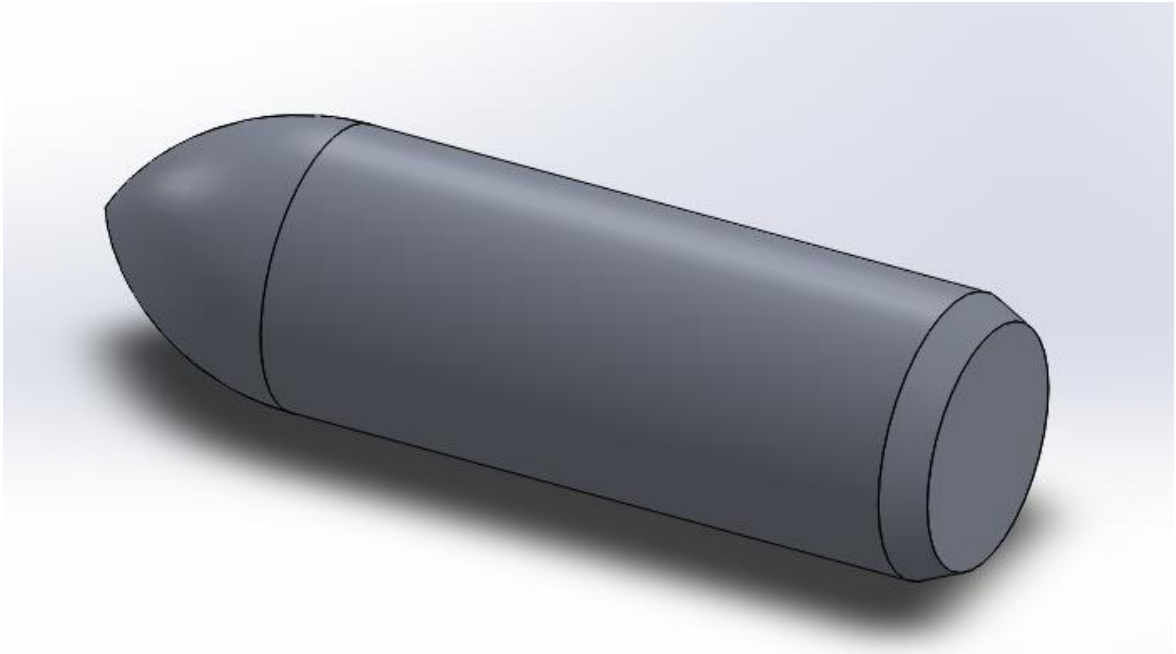


Рис. 2.3 3D-модель №1

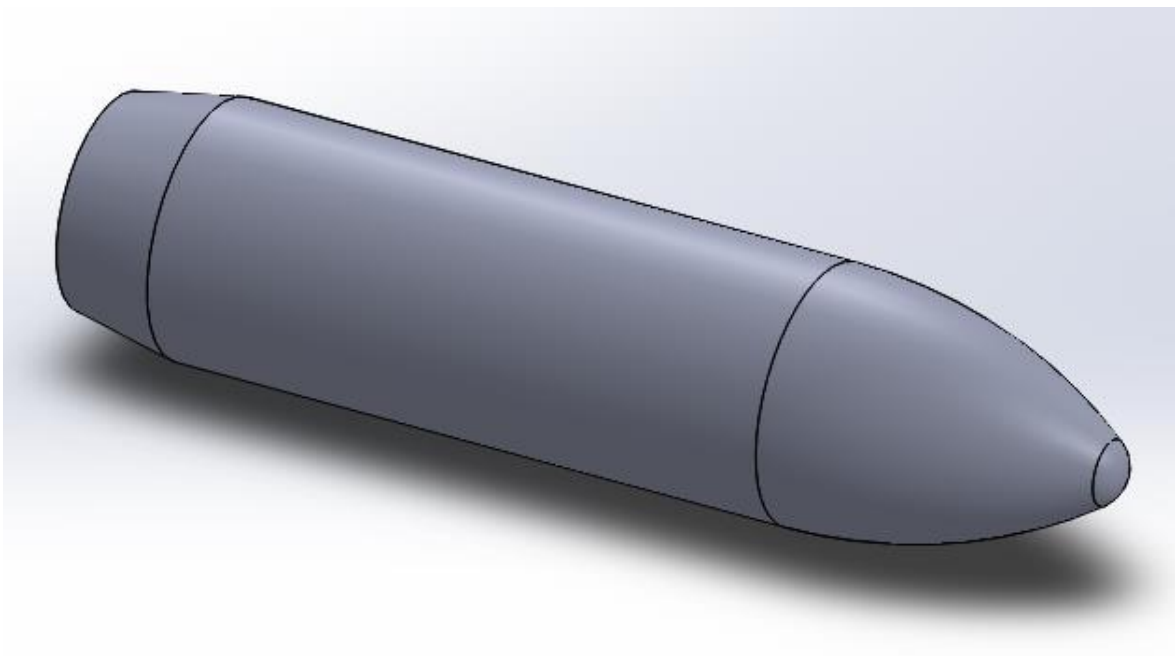


Рис. 2.4 3D-модель №3

Для моделей №2 та №4 початкові ескізи та базові 3D моделі будуть ідентичні моделям №1 та №3 відповідно.

Розглянемо процес створення крила на прикладі моделі №4, для моделі №2 всі дії будуть ідентичними, окрім задання розмірів.

На основі вже існуючої моделі необхідно створити допоміжну площину, побудова її відбувається використавши інструмент «Plane», який знаходиться в групі «Reference Geometry» вкладки «Features». Після його активації відкриється меню налаштування, необхідно зробити активним поле «First Reference» відкрити дерево проекту в робочій області та з нього обрати бажану площину, в даній моделі була використана «Top Plane». Вибравши необхідну площину меню налаштувань запропонує декілька варіантів, зробити її паралельною, перпендикулярною, дотичною, нахилити на кут чи перемістити на відстань, скористаємось останнім варіантом та піднінемо площину на відстань: $120\text{мм (радіус моделі)} + 100\text{ мм (висота крила)} = 220\text{ мм}$ та збережемо зміни. Створивши додаткову площину можна перейти до створення ескізу крила. Вибираємо площину та активуємо режим ескізу. Для моделі №4 ескіз крила має вигляд, який зображено на рис. 2.5.

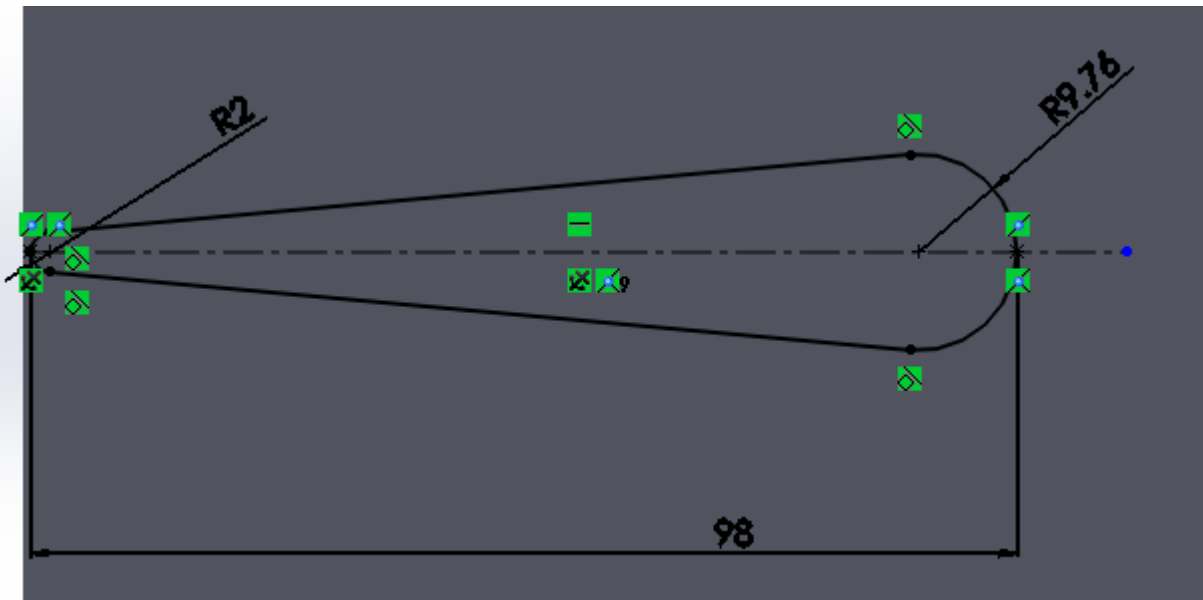


Рис. 2.5 Ескіз крила моделі №4

Побудувавши ескіз та вказавши необхідні розміри та залежності переходимо в вкладку «Features» та обираємо «Extruded Boss/Base». В налаштуваннях витягування проводимо реверс напрямку та замість «Blind» обираємо «Up to Next» та зберігаємо зміни. Площину можна сховати, щоб не

заважала під час побудови інших елементів натиснувши на неї в дереві проекту правою клавішою миші та обравши режим «Hide». З результатом побудови одного крила можна ознайомитись на рис. 2.6.



Рис. 2.6 Результат побудови одного крила

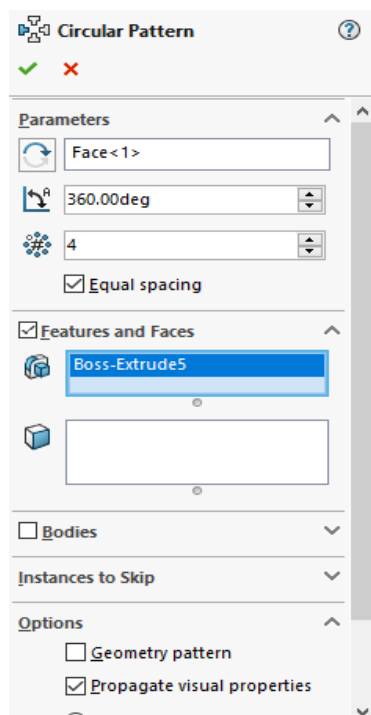


Рис. 2.7 Меню налаштування Circular Pattern

Для того, щоб не засмічувати проект повторними діями для інших 3 крил скористаємось функціоналом Solidworks «Circular Pattern (круговий масив)». Обравши його з меню вкладки «Features» відкриється меню налаштування. Активуємо поле «Pattern Axis» та виберемо циліндр моделі, щоб не створювати зайвих додаткових ліній, активуємо галочку «Equal spacing», якщо вона не була активована, задамо кут 360° та кількість елементів, що мають бути відображені – 4. Виберемо поле «Features to pattern» та оберемо наше вже побудоване крило. З кінцевим меню налаштування можна ознайомитись на рис. 2.7.

Після збережень налаштувань модель буде мати всі 4 крила, кінцевий варіант 3D моделі №4 відображено на рис. 2.8.

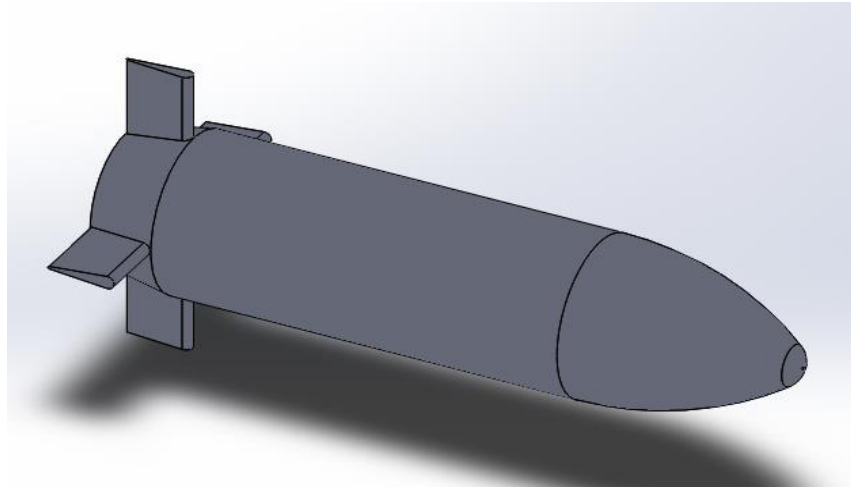


Рис. 2.8 3D-модель №4

Відмінністю для створення крил моделі №2 є те, що крила будуть знаходитись на відстані 150 мм від корми та спочатку буде будуватись прямокутник, після цього буде створений ескіз на одній з граней, щоб отримати прямокутний трикутник і за допомогою інструменту «Extruded Cut» видалимо зайву частину і після цього, так само за допомогою кругового масиву зробимо їх 4 одиниці вибравши в «Features to pattern» з дерева проекту «Cut-Extrude», щоб видалити зайву частину та «Boss-Extrude». 3D модель №2 відображена на рис. 2.9.

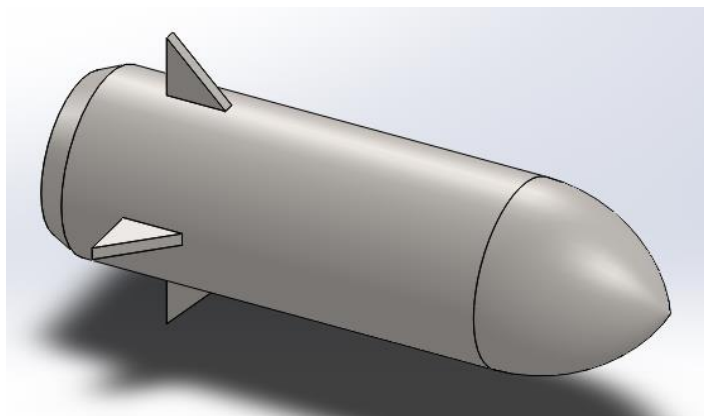


Рис. 2.9 3D-модель №2

2.2 Побудова моделі для аналізу в Ansys Fluid CFX

Оскільки для проведення аналізу гідродинаміки та моделювання потоку необхідний замкнутий простір на основі моделей, що надаються вище

провести його немає можливості. Для вирішення цього питання було прийнято рішення створити прямокутну область, де в середині буде знаходитись порожній простір за розмірами моделі. Відстань від вхідного отвору до початку моделі буде складати 3000 мм, висота від середини моделі – 1000 мм; від моделі до вихідного отвору – 4000 мм. Результуючі моделі відображені на рис. 2.10 – рис. 2.13.

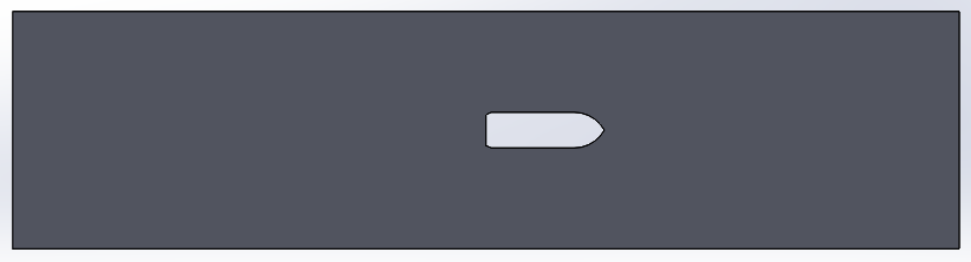


Рис. 2.10 Модель №1 для аналізу в Ansys

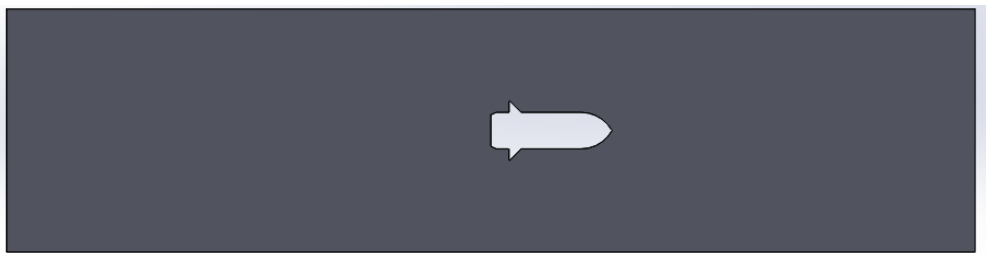


Рис. 2.11 Модель №2 для аналізу в Ansys

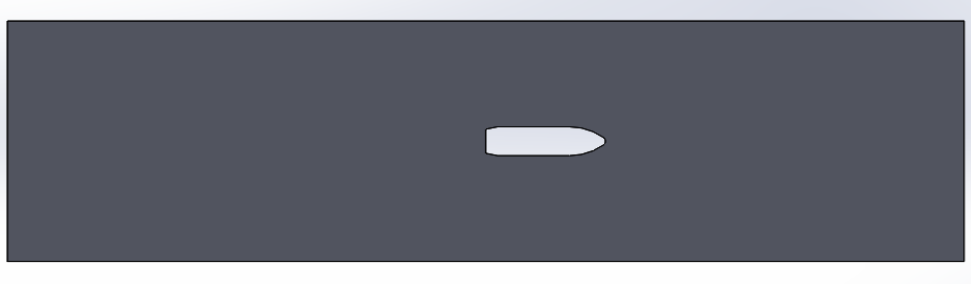


Рис. 2.12 Модель №3 для аналізу в Ansys

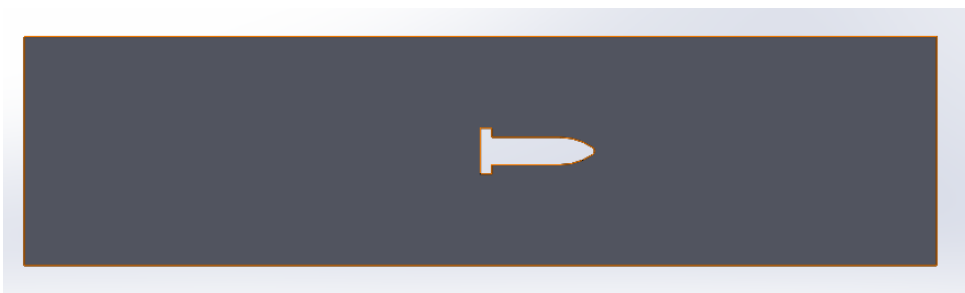


Рис. 2.13 Модель №4 для аналізу в Ansys

На основі даних моделей в наступному розділі будуть проводитись дослідження швидкості, тиску, турбулентності, сили та інших параметрів.

Приклад ескізу відображено на рис. 2.14 на основі моделі №2.

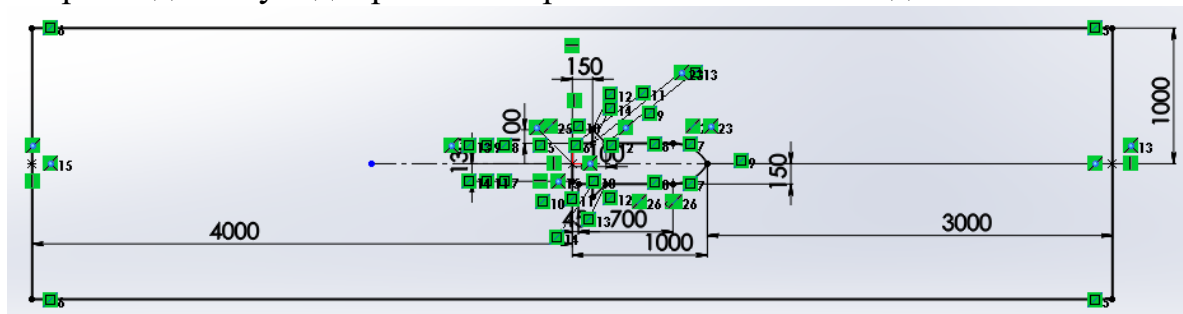


Рис. 2.14 Ескіз моделі №2 для аналізу в Ansys

2.3 Створення креслення на основі 3D моделі

Окрім створення моделі для документації необхідно також створювати креслення деталі. До моменту появи систем CAD їх створення відбувалось в ручну і займало безліч часу. В даний момент, Solidworks дозволяє максимально автоматизувати та пришвидшити процес створення. При необхідності по вказаним моделям можна швидко отримати креслення обравши в меню розділ «File» та далі обрати «Make drawing from part» після відкриття обрати формат листа. У прикладі, наведеному нижче використовується A3 GOST.

Вибравши необхідний формат відкривається нове робоче вікно, яке дозволяє працювати з кресленнями. Для початку виберемо вид спереду, зліва та триметрію. Окрім звичайного відображення видів моделі можливо також провести розріз деталі, відобразити частину виду в збільшеному масштабі, надавати анотації, задавати розміри та інше використовуючи вкладки «View Layout» & «Annotation». Вибираючи інструмент розрізу «Section view» можна обрати як простий розріз так і більш складний, задавати масштаб. Приклад креслення відображено на рис. 2.15

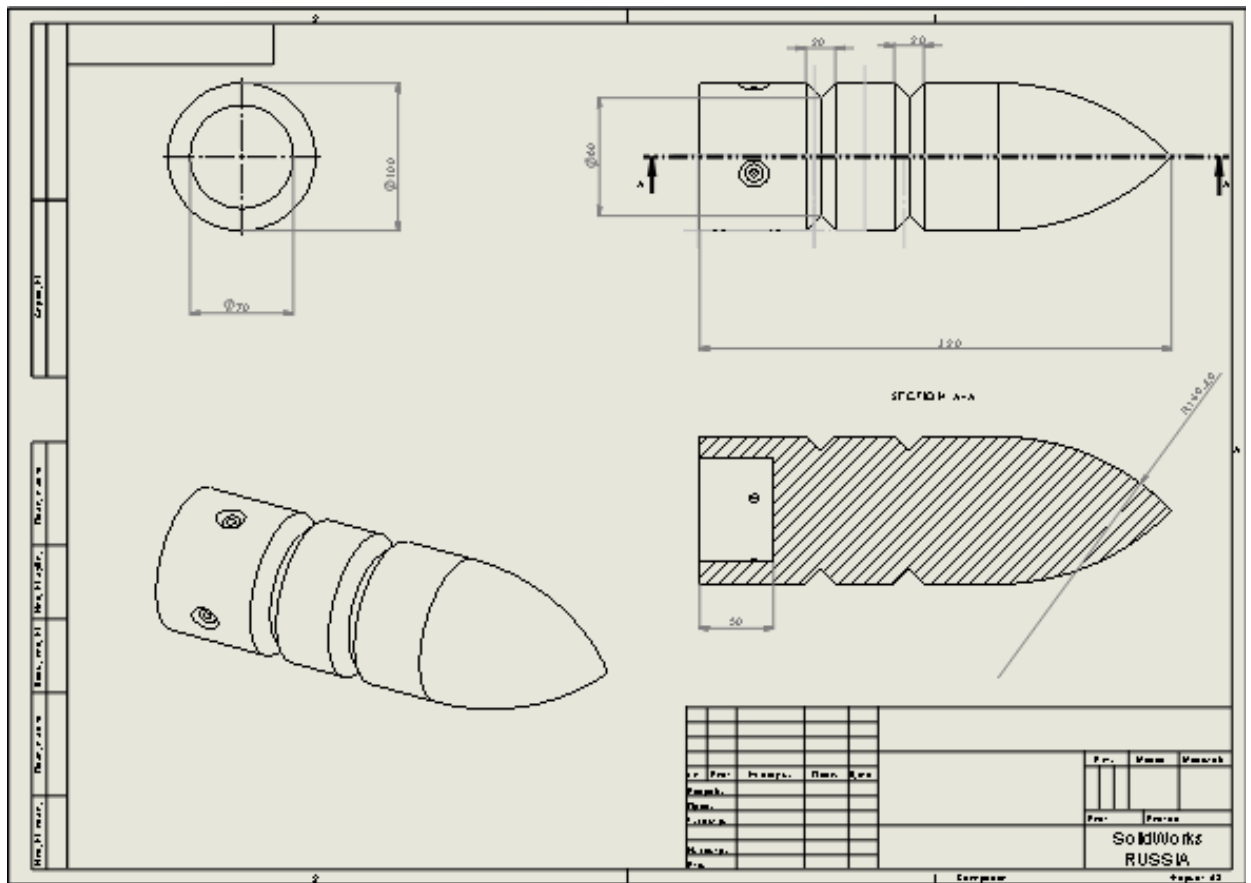


Рис. 2.15 Приклад креслення моделі в Solidworks

2.4 Додаткові пакети які можна було б використати для аналізу моделі

Solidworks окрім основних елементів, які надаються майже в усіх пакетах CAD систем володіє також інструментарієм CAE систем. Окрім створення самої моделі можна оцінити частоту власних коливань, стійкість провести розрахунок потоку рідини/ повітря, виміряти масу, змодельовати рух об'єкту в залежності від заданих зовнішніх сил. Якщо додаткові пакети вже було інстальовано їх можна активувати в розділі «Solidworks add-ins».

Коротко розглянемо деякі з них [15]:

- 1) **Solidworks Motion** – використовується для точного моделювання та аналізу руху в збірці, беручи до уваги елементи дослідження руху (включаючи сили, пружини, демпфери та тертя). При дослідженні руху об'єднуються елементи руху з сполученнями в розрахунках

руху. Виходячи з цього, обмеження руху, маса матеріалу і контакти компонентів включаються при обчисленні кінематичної програми, що вирішується. При аналізі руху також розраховуються навантаження, які можуть бути використані для визначення схем навантаження в структурному аналізі.

- 2) **Solidworks Simulation** – набір простих в застосуванні елементів для структурного аналізу, в яких використовується метод скінченних елементів. Такий аналіз дозволяє спрогнозувати поведінку виробу в реальному середовищі шляхом віртуального тестування CAD-моделей [16].

За допомогою даного доповнення можна провести наступні аналізи та дослідження:

- лінійний статичний аналіз;
- нелінійний статичний аналіз;
- частотний аналіз;
- аналіз гармонічних коливань;
- аналіз довільних коливань;
- змінні навантаження та інші, з якими можна ознайомитись за посиланням [16].

- 3) **Solidworks Flow Simulation** - це обчислення гідродинаміки (CFD), яке повністю вбудоване в SOLIDWORKS. Воно дозволяє швидко і просто моделювати ефекти потоку, теплообміну і гідродинамічних сил, які критично важливі для успішного проектування [17].

Основними перевагами даного доповнення являються [17]:

- оцінка продуктивності виробу при швидкій зміні декількох змінних;
- зниження собівартості завдяки скороченню кількості переробок і поліпшенню якості;
- легкість його використання;

Доповнення можна використовувати для вирішення наступних задач [17]:

- Вивчення і візуалізація повітряного потоку для оптимізації систем і розподілу повітря.
- Віртуальні випробування виробів в цифровому середовищі, максимально наближеною до реальної та інші [17].

Однак даний пакет є лише доповненням який надає непогані результати при його використанні, для вирішення більш складних завдань та/або тих які потребують максимальної точності краще використовувати спеціальні програмні забезпечення, як приклад пакет Ansys Fluid CFX, який буде розглянуто в наступному розділі та був використаний для моделювання потоку рідини.

Програмний комплекс САПР SolidWorks достатньо обширний і може бути використаний для вирішення багатьох задач при моделюванні та/або дослідженні моделі і розглянути повний функціонал в рамках однієї роботи немає можливості. Більш детально можна ознайомитись на сайті SolidWorks в розділі «Help».

Висновки до розділу 2

При виконанні другого розділу було розглянуто основні можливості програмного забезпечення САПР SolidWorks, його інструменти, додаткові пакети, які можна встановити за умови наявності ліцензії. За допомогою даного ПЗ було розроблено чотири моделі, які відрізняються за геометричною формою та наявністю додаткових елементів конструкції. Чотири моделі розроблено для подальшого аналізу в програмному середовищі CAE системи Ansys Workbench.

Незважаючи на переваги пакету Solidworks Flow Simulation було прийнято рішення не використовувати його в рамках даної роботи, оскільки результати мають відносно велику похибку та являються грубими, що може вплинути на якість результатів в подальших випробуваннях.

РОЗДІЛ 3

ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Налаштування модуля Fluid Flow (CFX) та проведення розрахунків

ANSYS Workbench є основним інструментом, на якому базується концепція «Проектування виробів на підставі результатів інженерних розрахунків» [18].

Це середовище дозволяє проводити найскладніші розрахунки, які можуть включати в себе найрізноманітніші області фізики за допомогою технології drag-and-drop. Проекти подаються у вигляді взаємопов'язаних систем в формі блок-схеми. З першого погляду можна зрозуміти інженерний задум взаємозв'язку між даними і стан проекту розрахунку [18].

Оскільки програмний комплекс містить велику кількість інструментарію, розглянути їх всі немає можливості. Увага буде зосереджена безпосередньо на модулі Fluid Flow (CFX).

Моделі, розроблені в попередньому розділі (рис.2.10 - рис.2.13), необхідно зберегти в одному із наступних форматів (*.x_t, *.x_b, *.step) та після імпортувати обрану геометрію в проект для подальшого аналізу.

3.1.1 Генерація сітки

Наступний крок після імпорту геометрії – розбиття геометрії на скінченні елементи (побудова сітки). Перейшовши в модуль Meshing було проведено налаштування деяких параметрів, а саме, в випадіючому меню Sizing параметр Use Adaptive Sizing було активовано, Resolution виставлено на максимальне значення – 7. При генерації сітки з даними параметрами (рис.3.1) та переглянувши кількість отриманих скінчених елементів в розмірі

9820 одиниць, було прийнято рішення, що сітка не може бути використана для точних розрахунків.

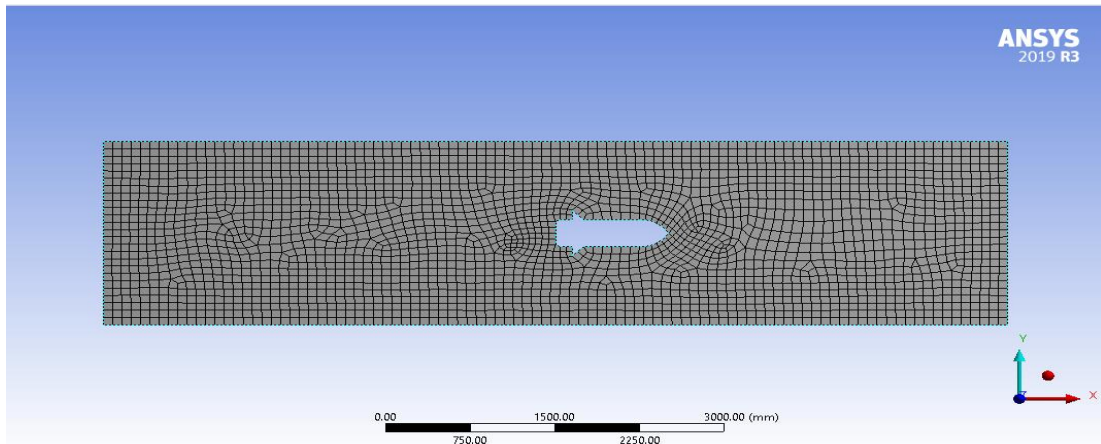


Рис. 3.1 Згенерована сітка без додавання Method для моделі №2

Для вирішення даного питання було додано Method в дерево проекту з наступними характеристиками: в ручному режимі було обрано метод побудови тетраедричних сіток незалежно від поверхонь (Patch independent) та була обрана опція підвищення якості (Refinement) за допомогою апроксимації та кривизни (proximity & curvature) з обмеженням мінімальним розміром 10 мм. Після побудови сітки після зміни кількість скінчених елементів для моделі №2 зросла до 2 444 506 одиниць, для інших трьох моделей кількість близька до даного значення, що більше ніж достатньо для точного результату. Кінцевий варіант сітки для моделі №2 відображено на рис.3.2.

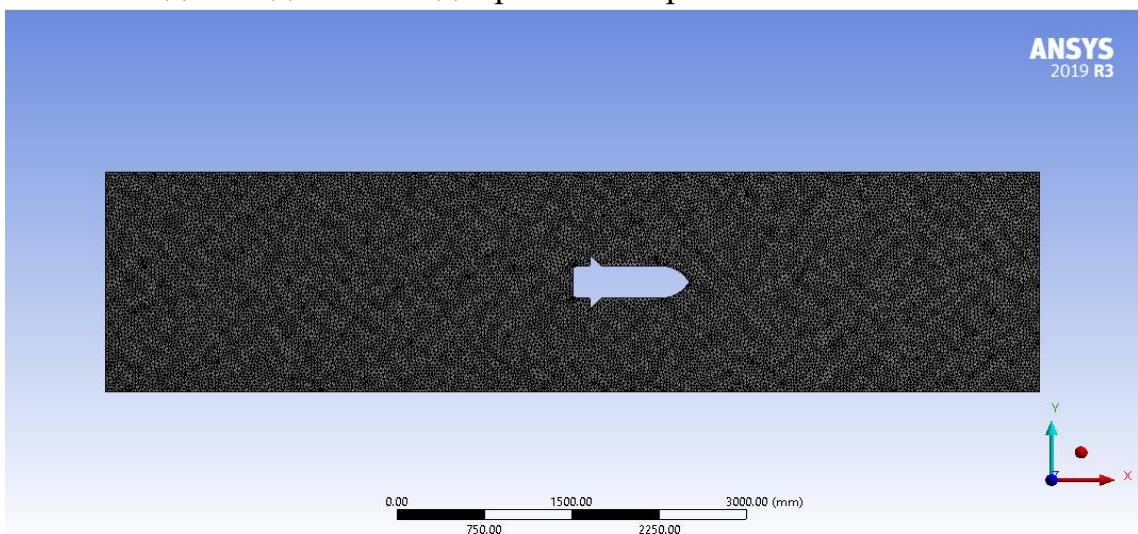


Рис. 3.2 Результуюча сітка для моделі №2

Окрім побудови сітки в модулі Meshing також було проведено іменування граней геометрії для задання граничних умов на наступному етапі за допомогою «Create Name Selection» з наступними назвами: Inlet, Outlet, Symmetry, Model, Top & Bottom. Ознайомитись з інформацією, яка назва відповідає грані геометрії можна на рис.3.3.

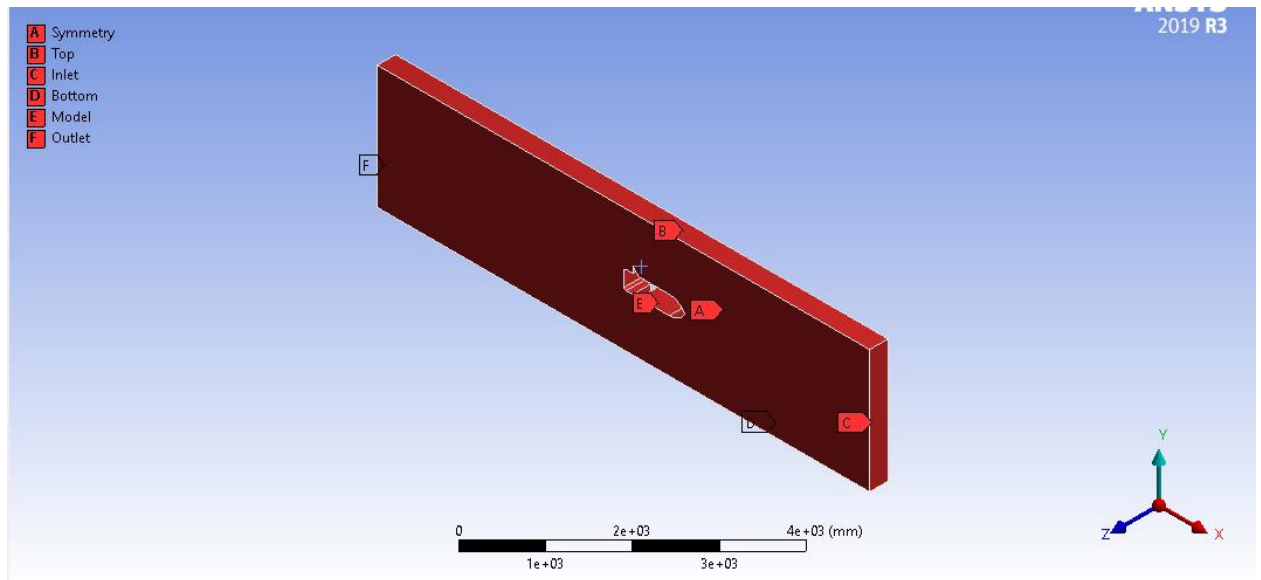


Рис. 3.3 Назви граней на прикладі моделі №2

3.1.2 Задання граничних умов та додавання нового матеріалу

Оскільки сітка вже була згенерована, грані були названі, можна переходити до задання граничних умов та додавання нового матеріалу (морської води) в модулі «CFX-Pre».

Для того, щоб додати новий матеріал справа необхідно знайти вкладку «Materials», яка знаходиться в меню налаштувань праворуч, натиснути на неї правою клавівшою миші та обрати «Insert» → «Material», діалогове вікно запросить вказати назву файлу, після цього необхідно натиснути на клавівшу «OK». У вікні, що відкриється, відображено дві вкладки: «Basic Settings», де вибирається до якої групи належатиме матеріал та його вид, у вкладці «Material Properties» задаються вже безпосередньо фізичні показники матеріалу, такі як молярна маса, густина, питома теплоємність, температура, тиск та інші (рис.3.4). По завершенню задання необхідних параметрів та

натиснувши на клавішу «ОК» матеріал буде збережено та буде доступний для використання в подальшому в рамках проекту.

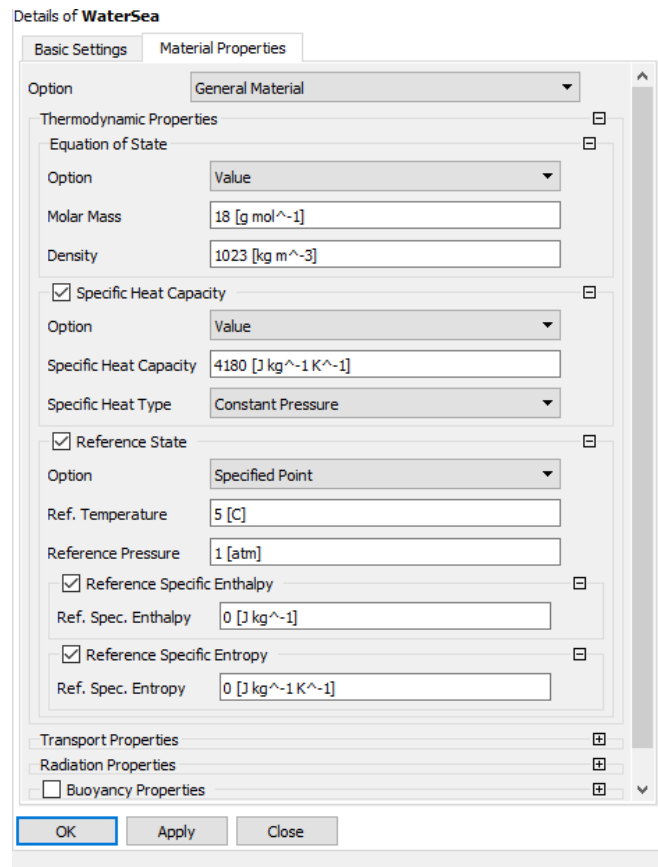


Рис. 3.4 Надання характеристик для морської води

Необхідно провести ще ряд незначних налаштувань перед заданням граничних умов. Для вибору матеріалу (морської води) необхідно двічі натиснути на Default Domain та для Fluid 1 обрати матеріал. Для того, щоб забезпечити коректний результат у дереві проекту у Solver Control було збільшено кількість максимальних ітерацій до 300 та Residual Target змінено на значення $1e-5$.

Для задання граничних умов необхідно обрати інструмент «Boundary» назвавши тип границі, назви будуть аналогічними тим, що були задані в модулі Meshing. Кожну границю необхідно створювати окремо, оскільки необхідно буде обрати локації границі та тип.

Було використано такі типи границь [19]:

- ✓ **Inlet** – автоматично в базових налаштуваннях було вибрано тип границі та локацію Inlet. Для налаштування швидкості потоку необхідно перейти у вкладку «Boundary Details» та в групі «Mass & Momentum» у випадаючому списку «Option» обрати один з запропонованих варіантів: Normal Speed (векторна швидкість), задається одним параметром в десятковому форматі або в якості функції, розмірність також можна вибрати при наданні цифрового значення; Cart.Vel. Components (надання швидкості в декартових координатах), значення можуть бути як від'ємними так і додатними в залежності від напрямку руху (проти або за напрямком осі. Вісь U відповідає X, V – Y і відповідно W – Z; Cyl. Vel. Components (надання швидкості в циліндричних координатах), Mass Flow Rate (масова витрата), Total Pressure (stable) (Загальний тиск (стабільний)) та Static Pressure (статичний тиск). Більш детально з кожним з даних варіантів можна ознайомитись на сайті [19], прописавши в пошуковій стрічці назву компонента який цікавить.
- ✓ **Outlet** – принцип базових налаштувань залишається аналогічним тому, що був розглянутий раніше. У вкладці «Boundary Details» так само можна обрати з випадаючого списку: Normal Speed, Cart.Vel. Components, Cyl. Vel. Components, Mass Flow Rate, Static Pressure. Зникає лише вибір Total Pressure (stable), однак з'являється інший варіант: Average Static Pressure (середній статичний тиск), даний варіант і було використано в налаштуваннях моделей з зазначенням дискретної величини 0 Pa.
- ✓ **Symmetry** - на цій вкладці для граничних умов симетрії можна встановити тільки рух сітки. Параметр «Рух сітки» встановлено Unspecified за замовчуванням.
- ✓ **Wall** – (був використаний для Name Selection - model) присутні три варіанти задання граничних умов на стінку: *No Slip Wall* (Без ковзання стінки), один з найпоширеніших типів виконання граничних умов

стілки. Рідина безпосередньо біля стінки приймає швидкість стінки, яка за замовчуванням дорівнює нулю. Ненульові швидкості стінок створюються двома способами: явним встановленням швидкості стінки та/або активацією деформації сітки [20]; *Free Slip Wall* (Вільне ковзання стінки), Вільне ковзання, де напруга зсуву на стінці дорівнює нулю, а швидкість рідини біля стінки не уповільнюється ефектами тертя стінки [20]; *Finite Slip Wall* (Кінцеве ковзання стінки), доступна лише для ламінарних потоків. Типовим використанням варіанту кінцевої ковзаючої стінки є імітація потоку неньютонівської рідини [20].

- ✓ **Opening** – (був використаний для Name Selection – Top & Bottom), так само є декілька варіацій вибору: Entrainment (засмоктування); Opening Pres. and dirn (Відкритий тиск); Static Pres. And dirn. (Статичний тиск) Cart.Vel. Components; Cyl. Vel. Components.

Для моделювання з типу границь були вибрані наступні варіанти: Inlet – *Normal Speed & Cart.Vel. Components*; Outlet - *Average Static Pressure 0 Pa*; Wall - *No Slip Wall*; Opening – *Opening Pres. And Dirn 0 Pa*.

По завершенню надання значень в робочій області отримали результат, який відображено на рис. 3.5.

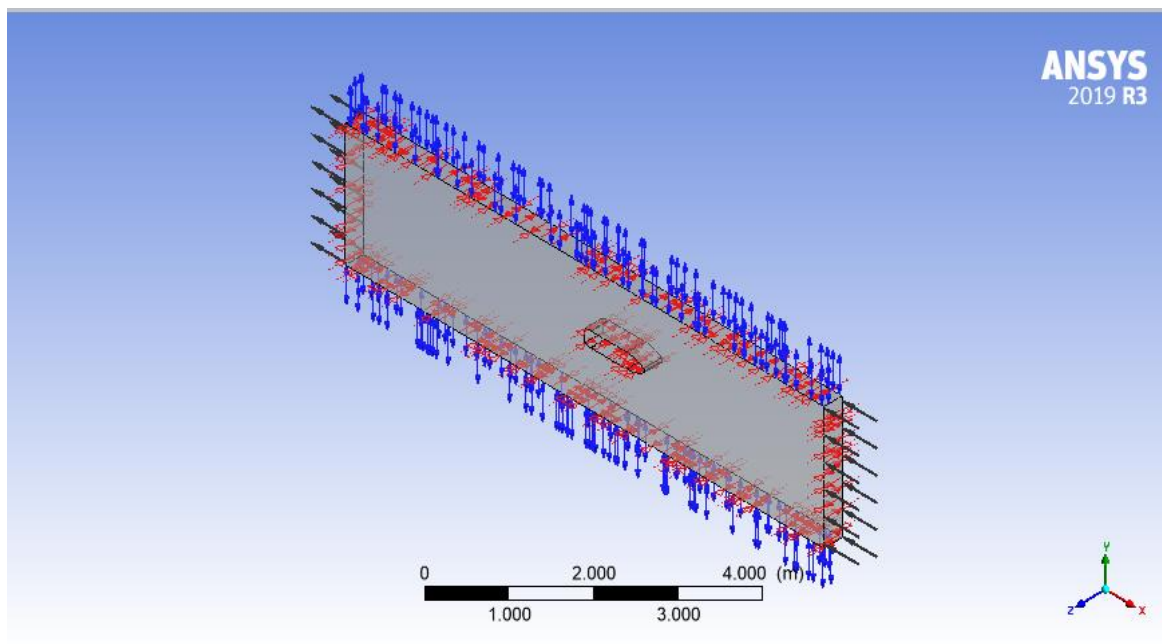


Рис. 3.5 Відображення граничних умов на напрямки векторів на моделі

На цьому моменті, всі налаштування були завершені та можна проводити розрахунки, для цього необхідно запустити CFX-Solver Manager, який автоматично запускається після вибору в блоці вкладки «Solution». Після запуску лише необхідно погодитись з усією інформацією і почнеться проведення розрахунків згідно закладених алгоритмів Ansys. Процес являється досить повільним та може зайняти декілька годин, в залежності від характеристик комп'ютера. Приклад вікна під час проведення розрахунків відображено на рис.3.6.

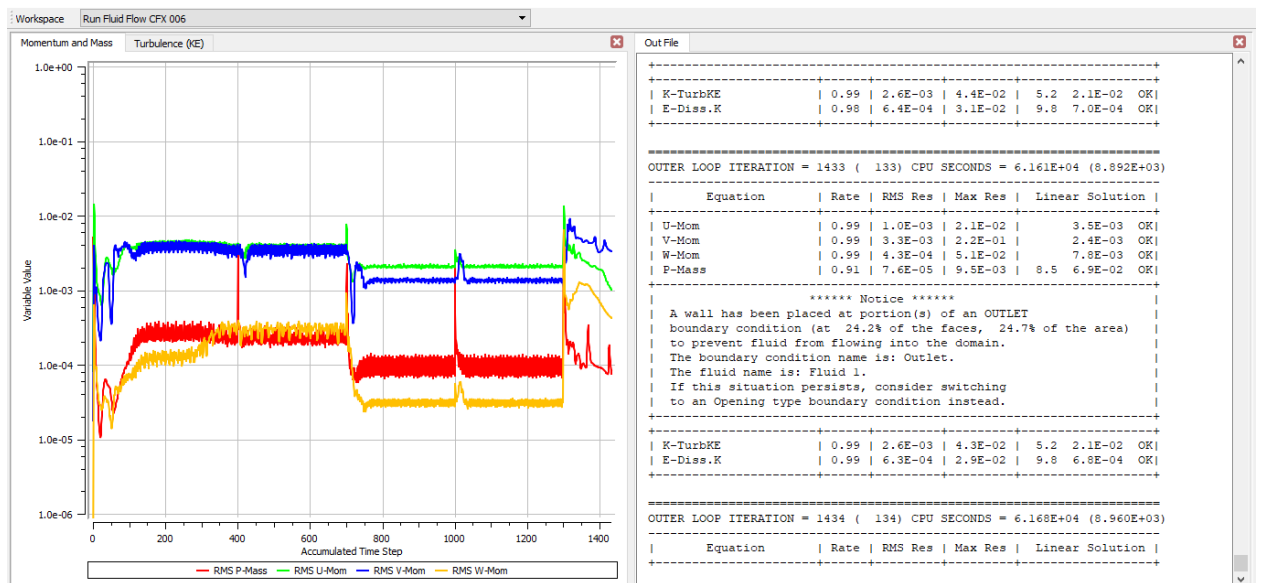


Рис. 3.6 Модуль CFX-Solver Manager при проведенні розрахунку

Після того, як розрахунок був завершений можна переглянути отриманий результат у графічному вигляді. Для цього було запущено модуль «CFX-Post» та обрано з верхньої стрічки інструмент Contour вказавши його назву для відображення в дереві результатів. В деталізації даного інструменту була обрана локація Symmetry для відображення результату та з випадуючого списку змінних (Variable), по черзі Velocity, Pressure & Turbulence Kinetic Energy.

Для інших моделей необхідно повторити ці самі дії при різних швидкостях (змінюючи їх в CFX-Pre), які вказані у завданні до дипломної роботи.

3.2 Відображення результатів та їх інтерпретація

Результати моделювання будуть відображені для моделей №1-№4 лише для швидкості 4 м. вуз за поздовжньою віссю, всі інші результати наведено в Додатку А до дипломної роботи.

Епюри розподілення швидкостей рідини наведено на рис. 3.7 – рис.3.10.

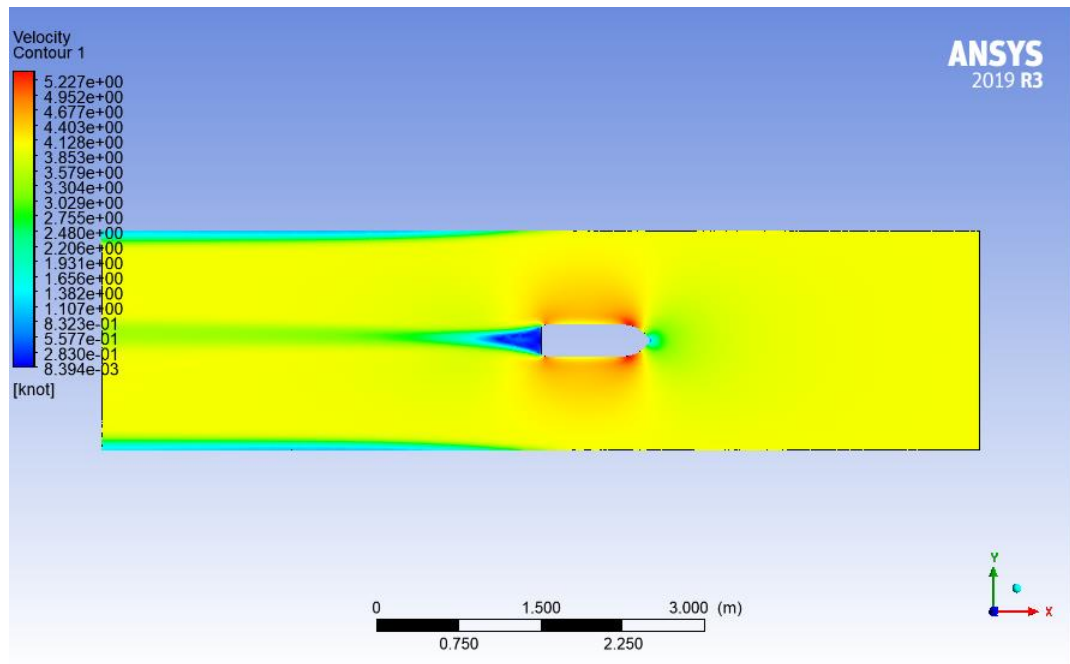


Рис. 3.7 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №1

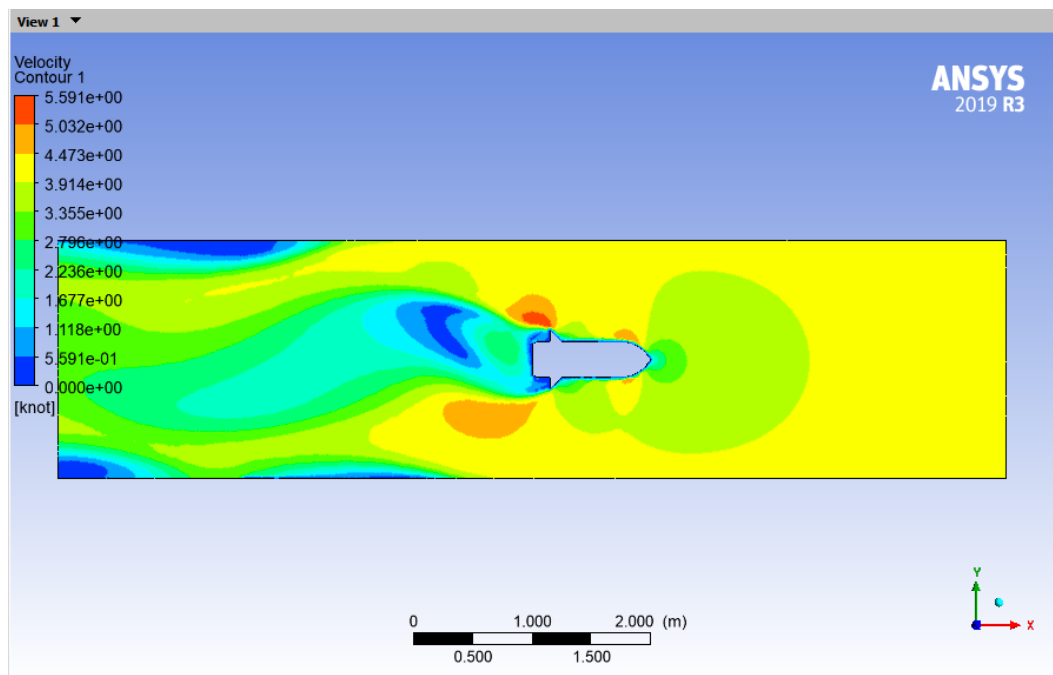


Рис. 3.8 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №2

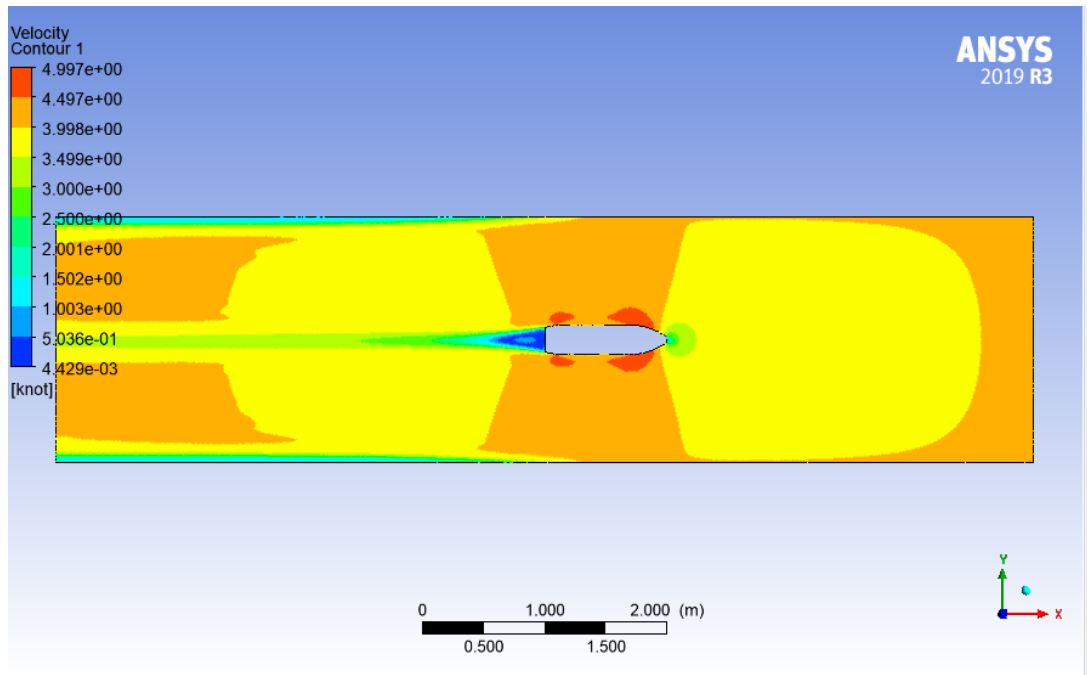


Рис. 3.9 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №3

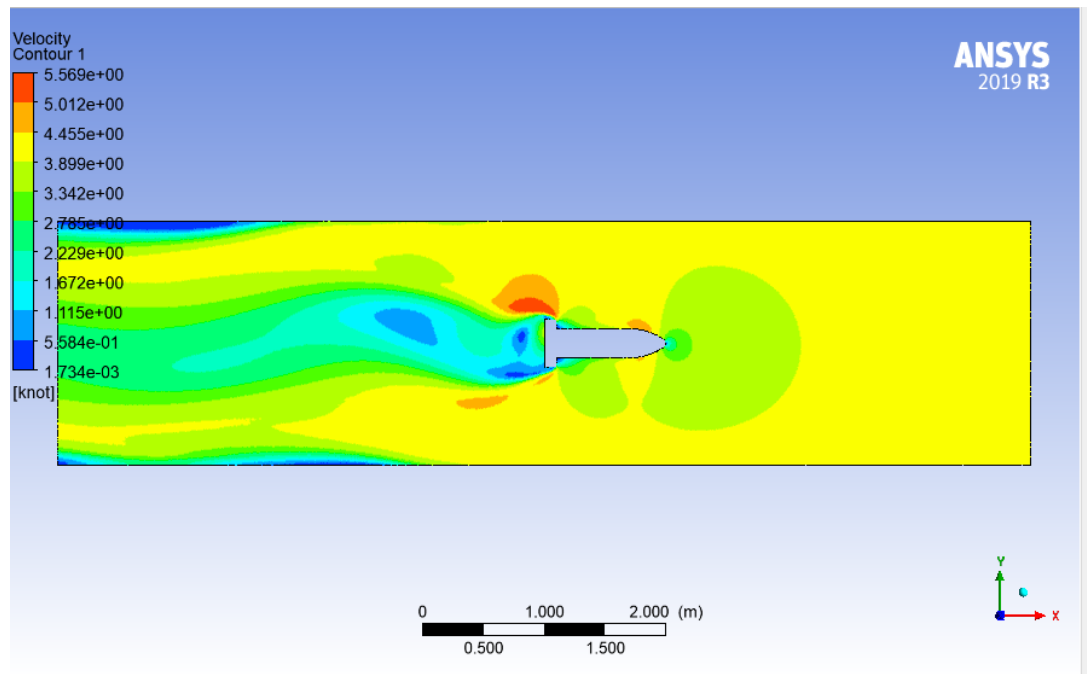


Рис. 3.10 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №4

Епюри тиску наведено на рис. 3.11 – рис.3.14.

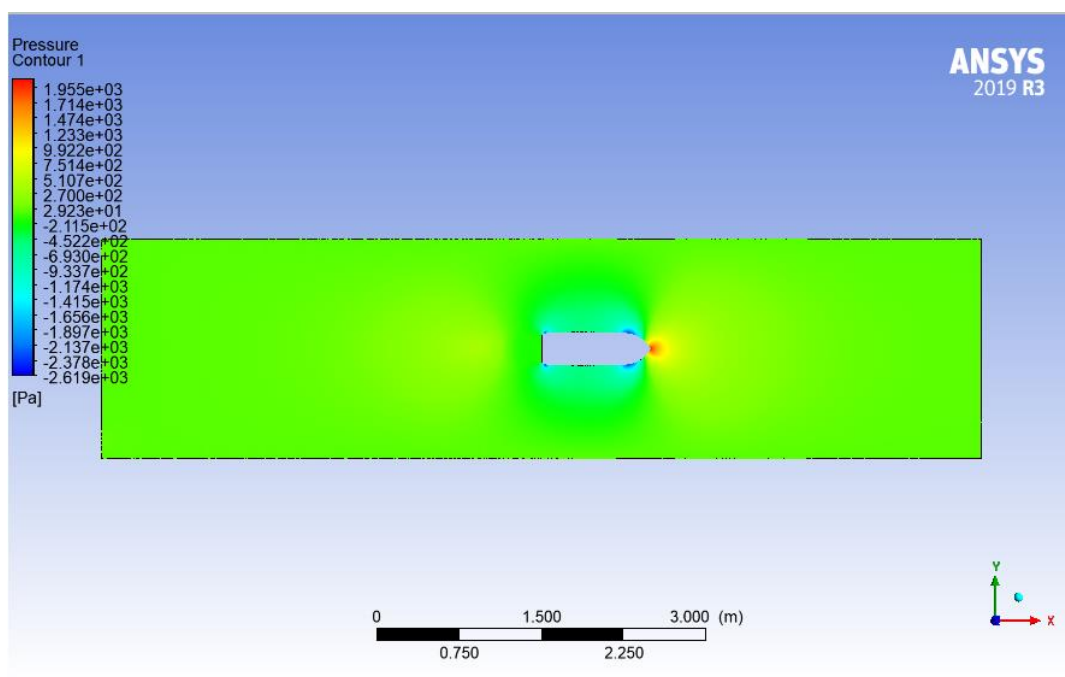


Рис. 3.11 Епюра тиску для моделі №1

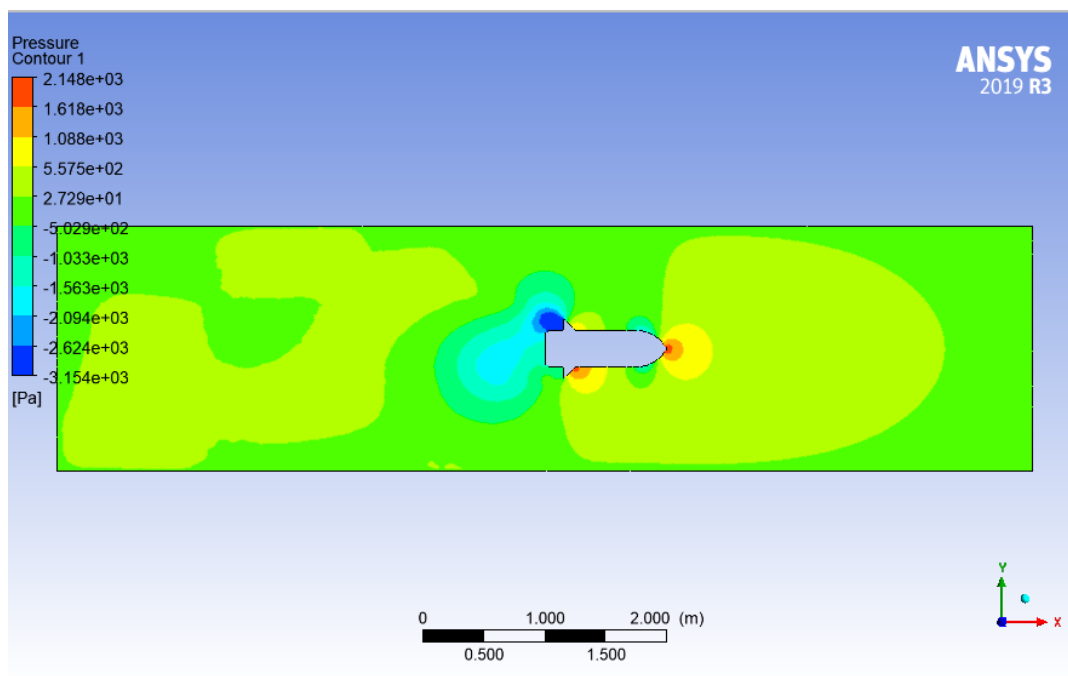


Рис. 3.12 Епюра тиску для моделі №2

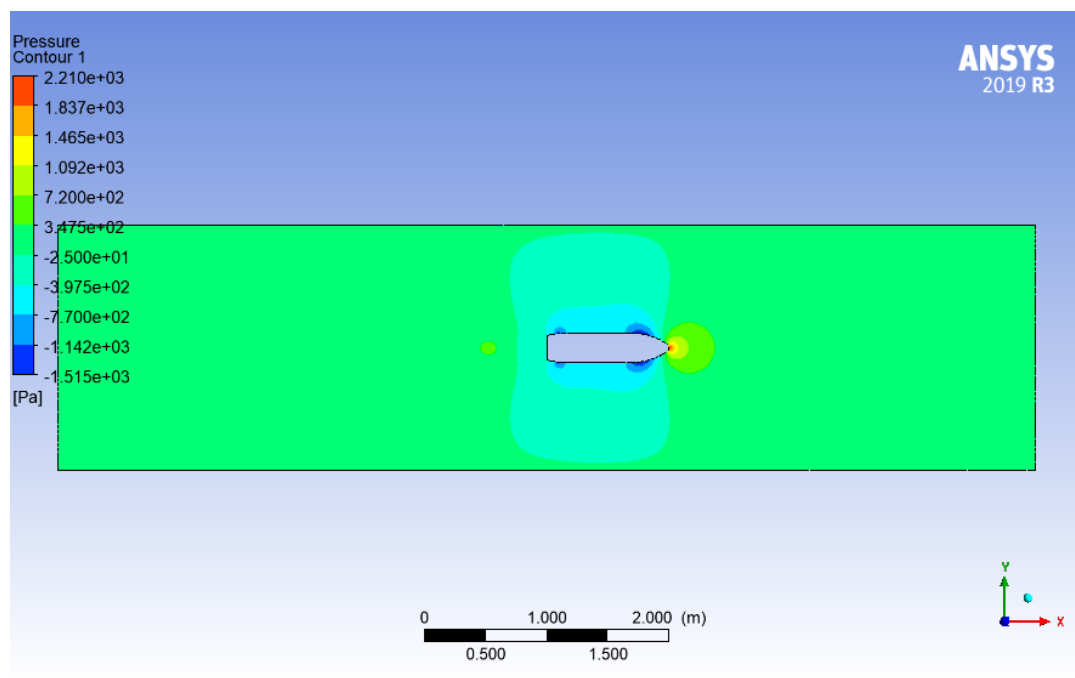


Рис. 3.13 Епюра тиску для моделі №3

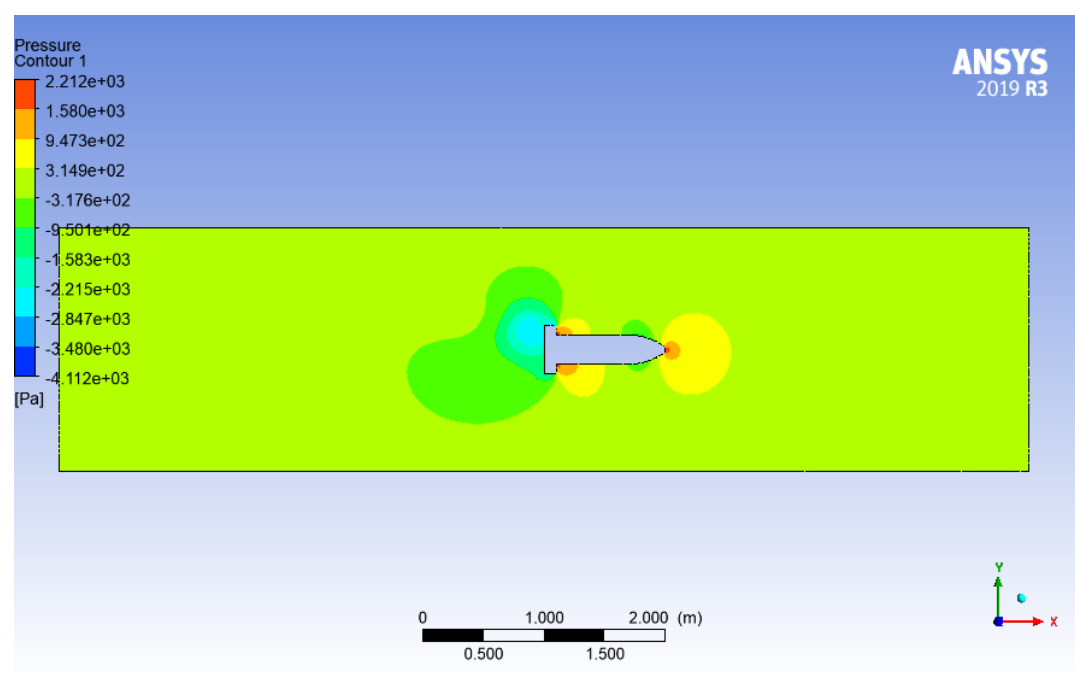


Рис. 3.14 Епюра тиску для моделі №4

Епюри кінетичної енергії турбулентності наведено на рис. 3.15 – рис.3.18.

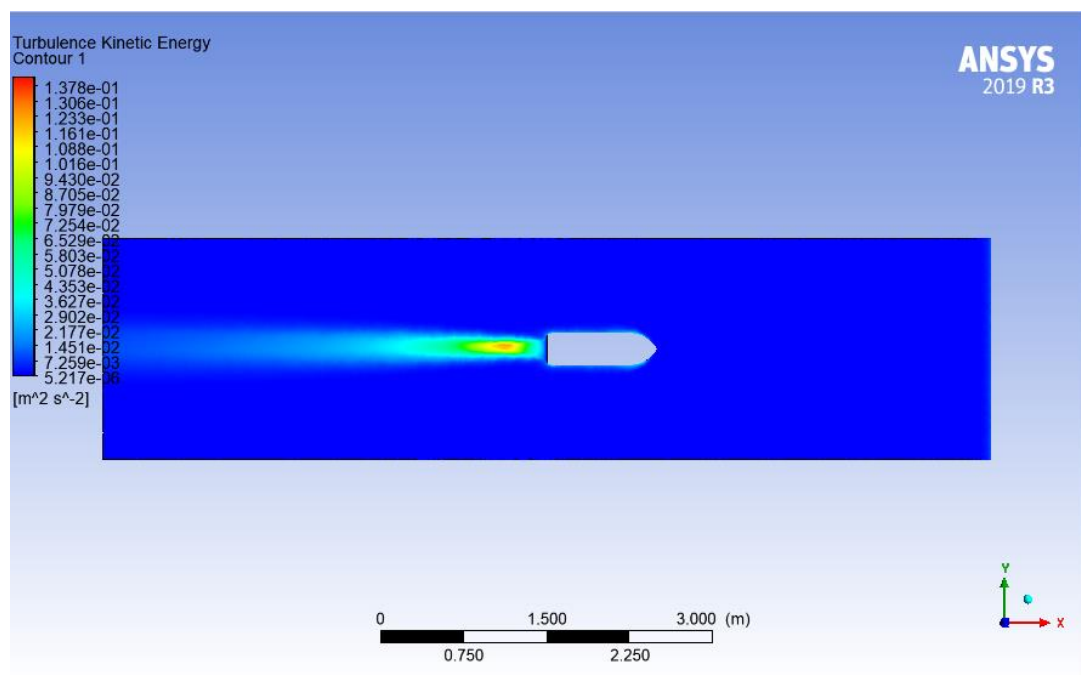


Рис. 3.15 Епюра кінетичної енергії турбулентності для моделі №1

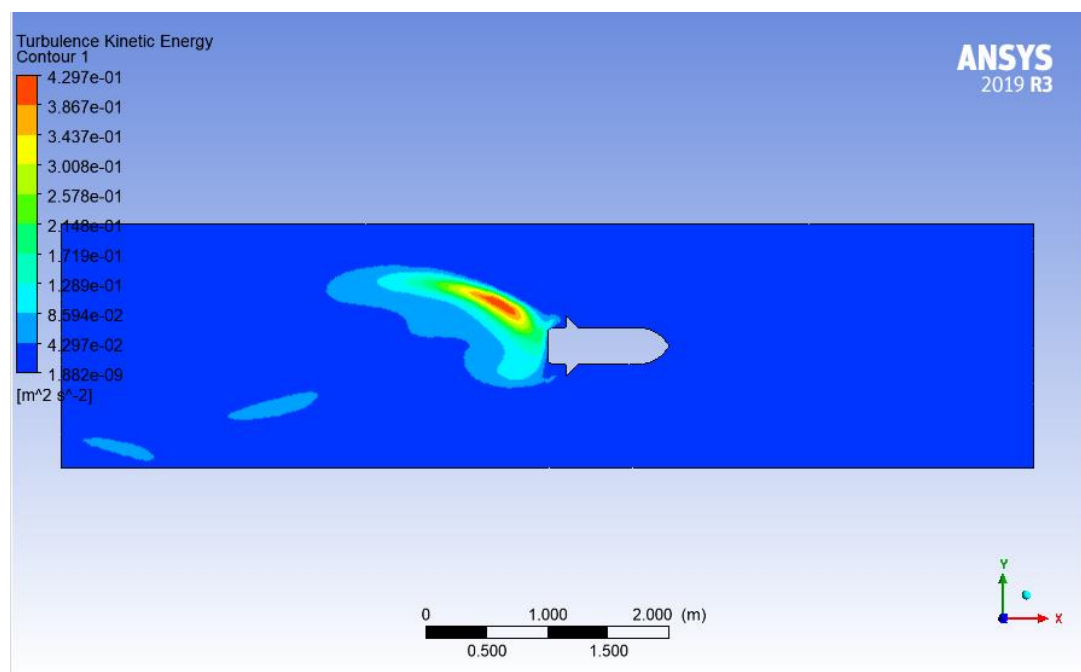


Рис. 3.16 Епюра кінетичної енергії турбулентності для моделі №2

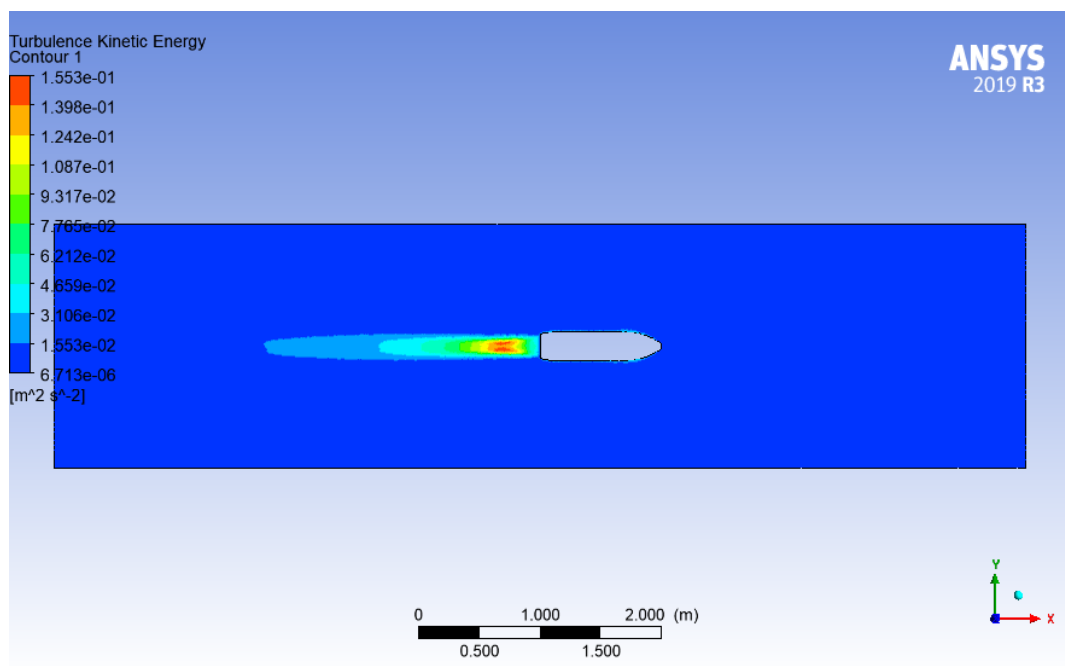


Рис. 3.17 Епюра кінетичної енергії турбулентності для моделі №3

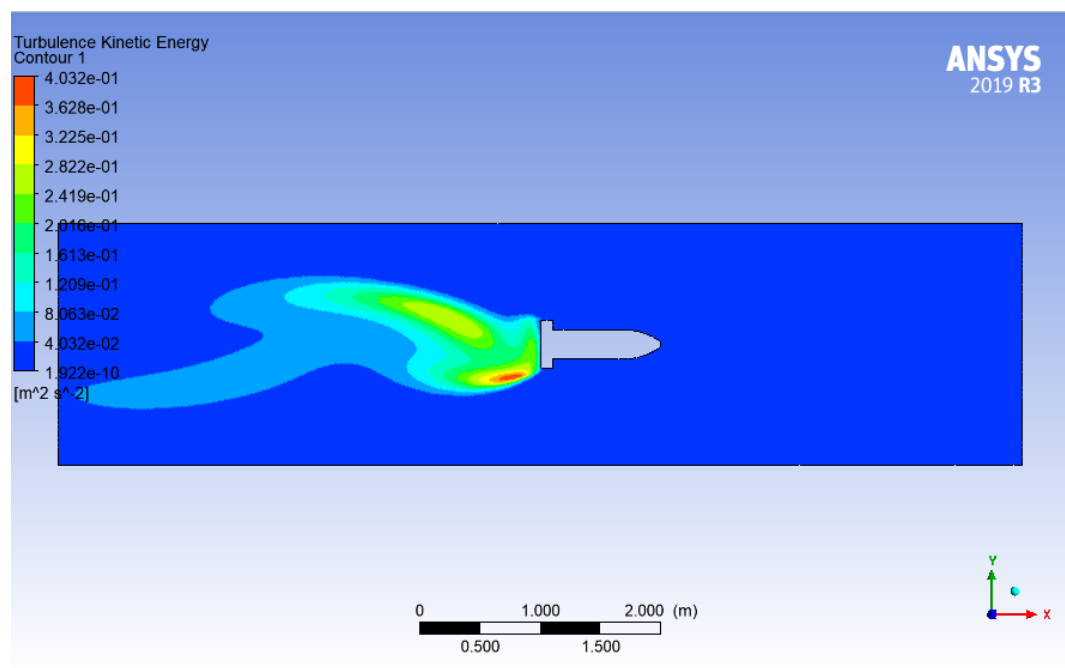


Рис. 3.18 Епюра кінетичної енергії турбулентності для моделі №4

Зведемо отриману інформацію до табл. 3.1, де будуть відображені максимальні та мінімальні значення отриманих вище характеристик.

Таблиця 3.1 Результати аналізу для моделей при швидкості 4 м. вуз. за поздовжньою віссю

Тип		Розподілення швидкості	Тиск, Па	Кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2 / \text{с}^2$
Модель №1	Min	8.394e-3	-2.619e+3	5.217e-6
	Max	5.227	1.955e+3	1.378e-1
Модель №2	Min	0	-3.154e+3	1.882e-9
	Max	5.591	2.148e+3	4.297e-1
Модель №3	Min	4.429e-3	-1.515e+3	6.713e-6
	Max	4.997	2.210e+3	1.553e-1
Модель №4	Min	1.734e-3	-4.112e+3	1.922e-10
	Max	5.569	2.212e+3	4.032e-1

З отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

➤ порівняння моделі №1 та №3:

- Числові значення розподілення швидкостей знаходяться в одному порядку та максимальні значення відрізняються лише на 4.4%, в моделі №3 через більший радіус скруглення зона розподілення є вищою.
- Через більш гострий ніс модель №3 має більший максимальний тиск в порівнянні з моделлю №1 на 11.54%.
- Оскільки моделі не мають додаткових елементів кінетична енергії турбулентності має досить низькі цифри, однак у третьої моделі вище на 11.27%.

➤ Порівняння моделі №2 та №4:

- Так само як і при порівнянні моделі №1 та №3, числові значення розподілення швидкості мають один порядок, однак вже відрізняються лише на 0.39%, це пов'язано з тим, що зона максимальної швидкості була зміщена з носової частини на кінець крила.

- Тиск при порівнянні цих моделей є більшим у моделі №4, однак відмінності числових значень є на порядки меншими та складають лише 2.89%.
- Кінетична енергія турбулентності є більшою у моделі №2, через геометричну форму крила та зміщення його від корми на 150 мм. Однак відмінності є незначними та складають лише 6.17%.

В табл. 3.2 та табл. 3.3 наведена інформація про максимальні та мінімальні значення характеристик при нормальній швидкості 5 м. вуз та по трьом осям (поздовжній – 7 м. вуз., вертикальній – 0.001 м. вуз., поперечній – 0.7 м. вуз.) відповідно.

Таблиця 3.2 Результати аналізу для моделей при нормальній швидкості 5 м. вуз.

Тип		Розподілення швидкості	Тиск, Па	Кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2 / \text{с}^2$
Модель №1	Min	0	-3.495E+3	4.808E-6
	Max	6.715	3.276E+3	2.393E-1
Модель №2	Min	6.157E-3	-5.414E+3	7.878E-9
	Max	7.152	3.346E+3	5.371E-1
Модель №3	Min	5.804E-3	-2.383E+3	6.578E-6
	Max	6.249	3.453E+3	2.466E-1
Модель №4	Min	1.731E-3	-4.579E+3	3.388E-11
	Max	6.691	3.456E+3	9.874E-1

Для моделей №1 та №3 наступні відмінності: модель №1 має максимальну зону розподілення швидкості, яка вище за числовим значенням на 6.94%. Максимальний тиск вище у моделі №3 на 5.13%. Максимальна кінетична енергія турбулентності при даному моделювання є більшою у моделі №3 на 2.96%.

Для моделі №2 та №4 наступні відмінності: швидкість моделі №4 на 6.44% вище, тиск є вищим у моделі №4 на 6.13%. Кінетична енергія турбулентності є вищою у моделі №4 на 45,6%. Єдине моделювання, де модель №4 має вище кінетичну енергію турбулентності ніж модель №2.

Таблиця 3.3 Результати аналізу для моделей при швидкості по трьом осям (поздовжній – 7 м. вуз., вертикальний – 0.001 м. вуз., поперечний – 0.7 м. вуз.)

Тип		Розподілення швидкості	Тиск, Pa	Кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2 / \text{с}^2$
Модель №1	Min	9.426E-3	-9.651E+3	3.436E-6
	Max	10.11	7.537E+3	4.716E-1
Модель №2	Min	7.708E-3	-1.295E+4	1.251E-10
	Max	10.05	8.268E+3	1.38
Модель №3	Min	1.313E-2	-5.548E+3	5.591E-6
	Max	9.795	8.804E+3	5.743E-1
Модель №4	Min	3.788E-3	-1.433E+4	9.864E-9
	Max	10.77	8.812E+3	1.32

Для моделі №1 та №4 наступні відмінності: модель №1 має зону розподілення швидкості (максимальну), яка вище за числовим значенням на 3.11% в порівнянні з модель №3. Максимальний тиск вище у моделі №3 на 14.32%. Максимальна кінетична енергія турбулентності при даному моделювання є більшою у моделі №3 на 17.77%.

Для моделі №2 та №4 наступні відмінності: швидкість моделі №2 вище на 6.68%, тиск є вищим у моделі №4 на 6.13%, кінетична енергія турбулентності вища у моделі №2 на 4.35%.

3.3 Рекомендації щодо подальшого моделювання

Дана робота є лише початком проведення моделювання АБПА і отримання результатів. Було отримано лише епюри тиску, розподілення

швидкостей та кінетичної енергії турбулентності. Програмний комплекс Ansys володіє достатнім інструментарієм для проведення моделювання будь-якої складності.

Також, в роботі було використано лише моделювання прямолінійного руху, для аналізу, яка модель краще буде поводитись в водному середовищі необхідно провести аналіз руху при різних траєкторіях.

Отримавши результати, 3D модель можна буде виконати повноцінно, а не як матеріальне тіло з геометричною формою, та проводити інші необхідні для розробки дослідження.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено моделювання характеристик АБПА різних геометричних форм при різних швидкостях. Для розрахунків було обрано програмне середовище ANSYS Workbench використовуючи модуль розрахунку Fluid Flow (CFX).

Після імпорту геометрії з зовнішньої CAD системи була побудована сітка для розрахунку моделей. Згенерована сітка має близько 2 444 000 скінчених елементів для моделей №1 - №4, що були розглянуті. Граничні умови для кожної моделі були використані однакові, для всіх моделей було використано 3 швидкості для отримання результатів.

Отримані результати були зведені до таблиць для кожної швидкості руху, що була обрана. З отриманих результатів було проведено порівняння моделей без додаткових елементів (№1 та №3) та з крильцями (№2 та №4). Без додаткових елементів рекомендовано використовувати модель №3, так як вона має більшу динамічність, ніж модель №1, для моделей з крильцями остаточного рішення немає та необхідно проводити додатковий аналіз при різних траєкторіях.

ВИСНОВКИ

1. В результаті огляду безпілотних підводних апаратів було розглянуто їх класифікацію, типи та функціональні можливості. В поточний момент, присутні автономні та телекеровані безпілотні підводні апарати. Більшу увагу привертають до себе саме автономні, оскільки можуть виконувати набагато більше задач та не потребують втручання оператора і спеціального кабелю-тросу. Створення системи керування АБПА є доволі складним та громіздким процесом та можуть виникати непередбачені складнощі. Для того, щоб не витратити зайві ресурси, моделювання та тестування проводять програмним шляхом і після приймається рішення чи доцільно було використано математичну модель.

2. Побудова 3D моделі була проведена у вигляді твердого тіла з геометричними особливостями АБПА типу «глайдер». Було розроблено чотири моделі, які відрізняються геометричними формами та наявністю додаткових елементів. На основі цих моделей можна проводити основні розрахунки та робити певні передбачення стосовно динаміки та руху об'єкта.

3. На основі розроблених моделей були проведені розрахунки основних характеристик об'єкта при різних швидкостях та проведено їх аналіз. Моделі, які мають додаткові конструктивні елементи (крильця) викликають більшу кінетичну енергію турбулентності, що покращує динаміку апарата при маневруваннях.

4. Зробити повноцінні висновки, які моделі краще використовувати для аналізу та розробки в подальшому, на основі матеріалу, що було надано в роботі не є раціональним, так як треба провести ще ряд додаткових досліджень, наприклад, моделювання руху за різними типами траєкторії, задати інший тип граничних умов та інше.

Отже, можна прийти до загального висновку, що для отримання остаточного вирішення, який апарат краще використовувати необхідно провести ряд додаткових моделювань та розрахунків моделей. Провести всі розрахунки в рамках даної роботи не було можливим, оскільки вони займають велику кількість часу та не можуть бути поміщені в рамки дипломної роботи.

Список використаної літератури

1. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития* / Л. Бочаров, И. Раен // ЭЛЕКТРОНИКА: НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ, БИЗНЕС. — 2009. — № 8. — С.88-93. — Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16726255_87019326.pdf
2. И. Белоусов. Современные и перспективные обитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – №5. – С. 79-88. –Режим доступа: http://pentagonus.ru/publ/vooruzhenie/sovremennye_i_perspektivnye_neobitaemye_podvodnye_apparaty_vms_ssha_2013/27-1-0-2415
3. Агеев М. Д., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В. Автономные подводные роботы: системы и технологии / отв. ред. Киселев Л. В. — М.: Наука, 2005. — 398 с. — ISBN 5-02-033526-6.
4. Исследование прикладных вопросов обеспечения контроля состояния морской среды Балтийского моря в зоне прокладки СЕГ. - СПб.: ЗАО "АПМП", 2006. - 234 с.
5. Телеуправляемые подводные аппараты. Общие сведения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tetis-pro.ru/faq/8028/>
6. Пшихопов В.Х. Устройство позиционно-траекторного управления мобильным роботом. Патент РФ № 2185279, бюл. № 20, 2002 г.
7. Фалкон 1000 (Falcon 1000) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tetis-pro.ru/catalog/falcon-1000-falcon-1000/>
8. Новые технологии спасения – телеуправляемый обитаемый подводный аппарат "ФАЛЬКОН" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emercomer123.livejournal.com/22094.html>
9. Автономные обитаемые подводные аппараты. Общая информация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tetis-pro.ru/faq/8059/>

10. Бурау Н.И. Обзор состояния современных автономных беспилотных подводных аппаратов / Н.И. Бурау, Л.Л. Яцко, М.Д. Расулов, Бобрик В.С. // Вестник инженерной академии Украины - 2017. - №4 - С. 12 – 17.

11. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Микроробототехника - Электроника. Наука, технология, бизнес. - 2009. - №7. - с.62-69. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16726229_58647134.pdf

12. Разработка систем управления и навигации автономных беспилотных подводных аппаратов. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rirpc.ru/razrabotka-sistem-upravleniya-i-navigacii-avtonomnymi-neobitaemymi-podvodnymi-apparatami/>

13. Создание простейшей модели в Solidworks с помощью эскиза. - Муравьев О. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sapr-journal.ru/uroki-solidworks/sozdanie-prostejshej-modeli-v-solidworks-s-pomoshhyu-eskiza/>

14. SOLIDWORKS Web Help. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>

15. Обзор Анализа движения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks/motionstudies/COSMOS_Motion_Overview.htm

16. SOLIDWORKS SIMULATION. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.solidworks.com/sites/default/files/2019-08/2020_SW_Simulation_Datasheet_RU_WEB.pdf

17. SOLIDWORKS Flow Simulation. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://intersed.kiev.ua/flow_simulation

18. ANSYS Workbench. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-workbench>

19. Boundary Condition Modeling. Inlet. Inlet (Subsonic). –

[Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/cfx_mod/CHDIGAAJ.html

20. Boundary Condition Modeling. Wall. Mass and Momentum. –

[Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/cfx_mod/i1301372.html

Додатки

Додаток А

Епюра при швидкості 5 морських вузлів.

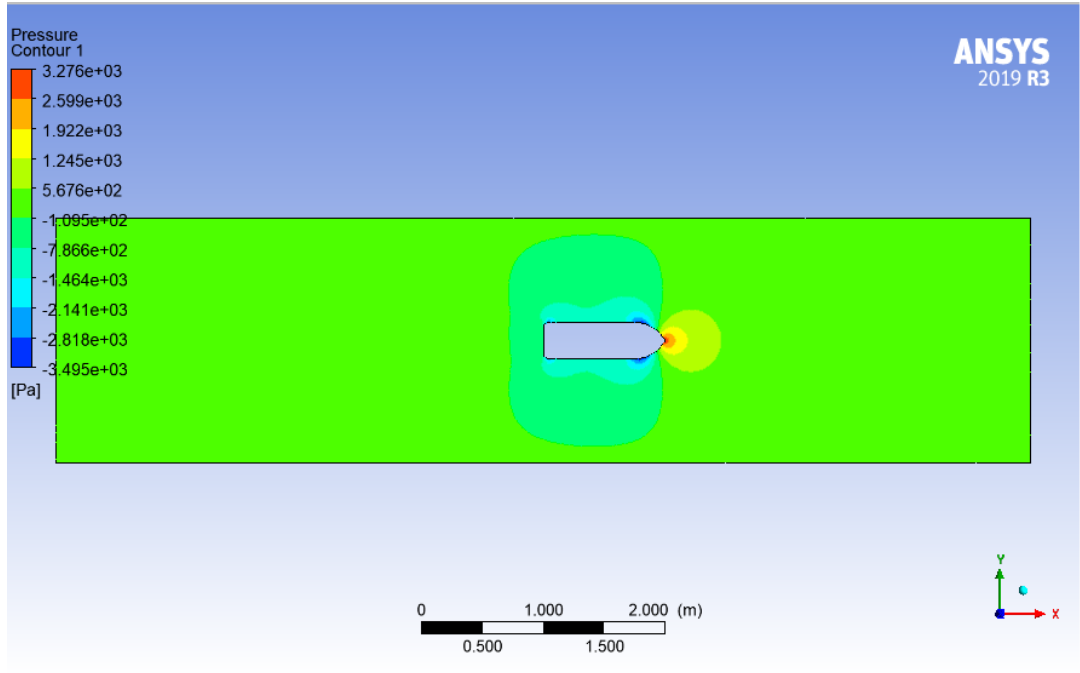


Рис. А.1 Епюра розподілення тиску для моделі №1

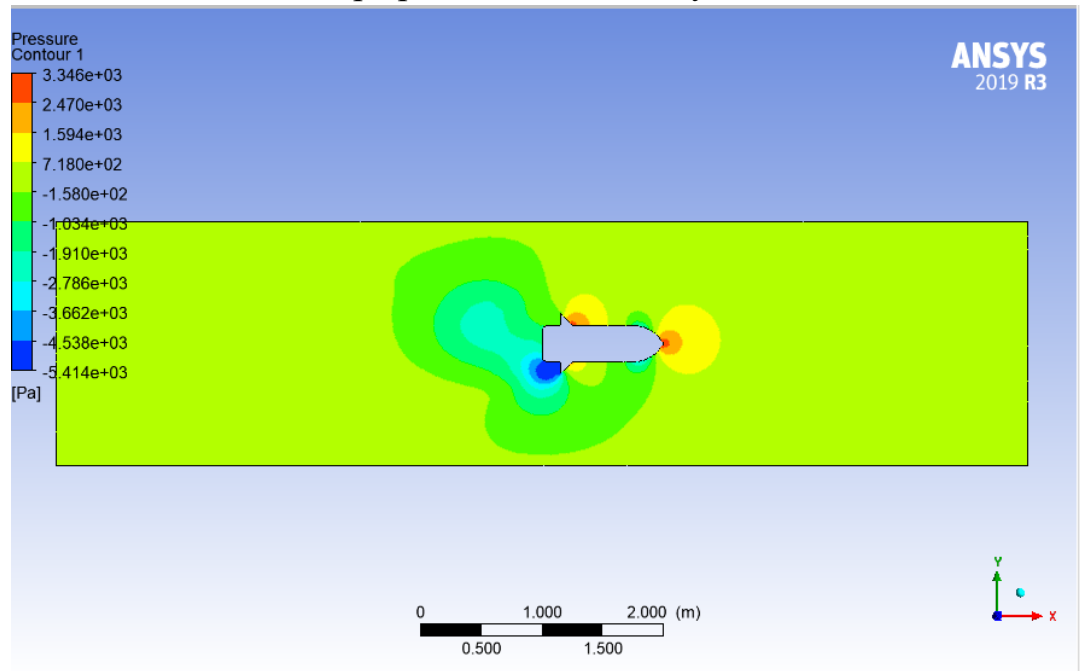


Рис. А.2 Епюра розподілення тиску для моделі №2

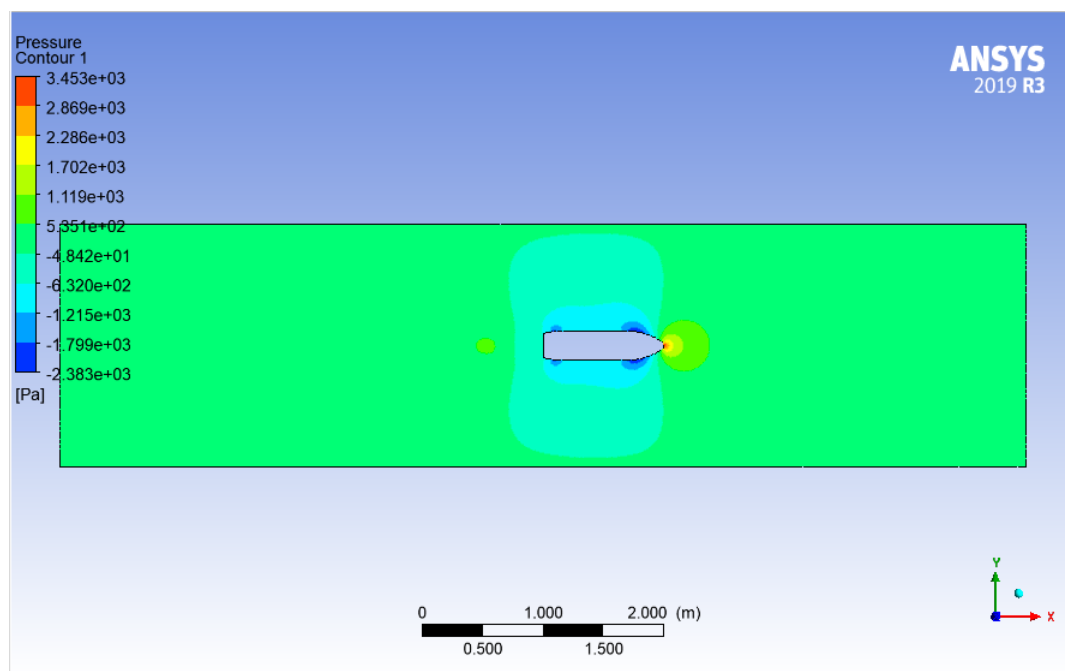


Рис. А.3 Епюра розподілення тиску для моделі №3

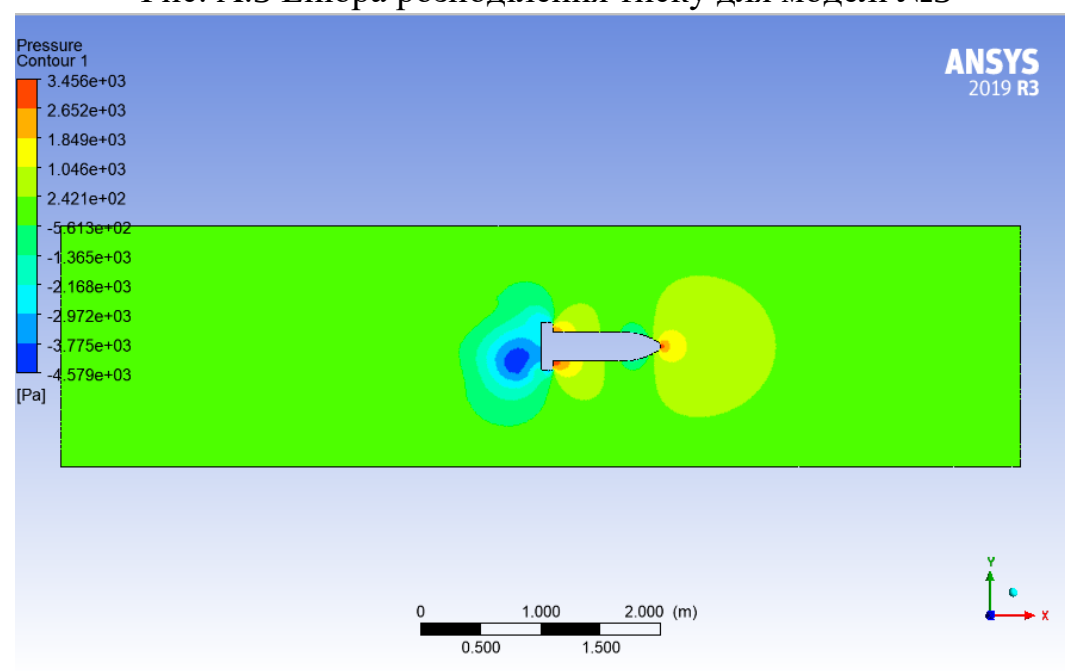


Рис. А.4 Епюра розподілення тиску для моделі №4

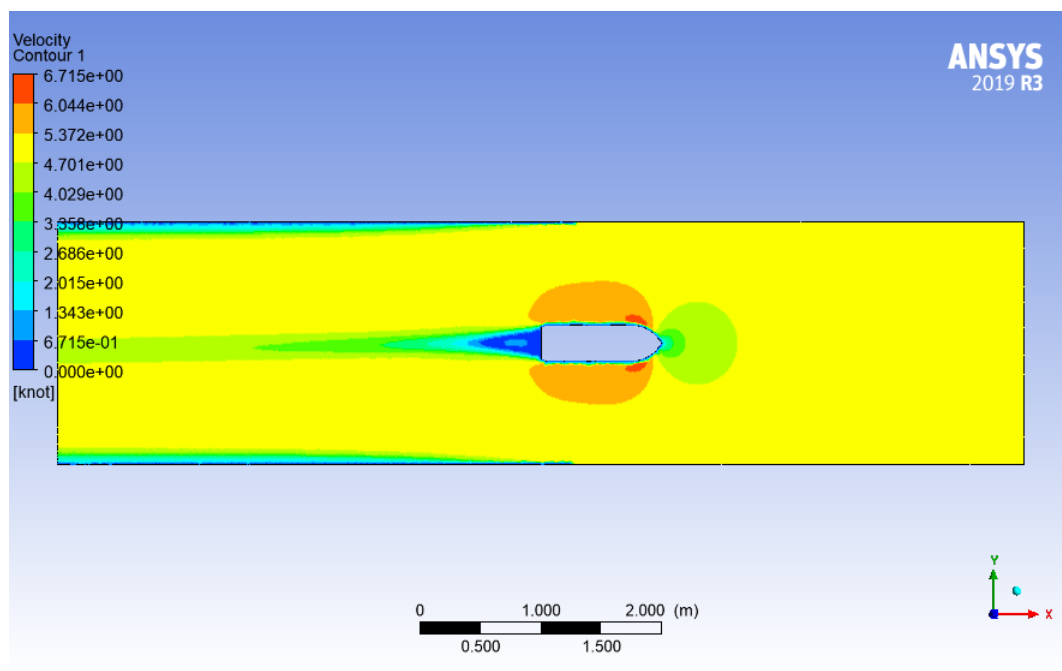


Рис. А.5 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №1

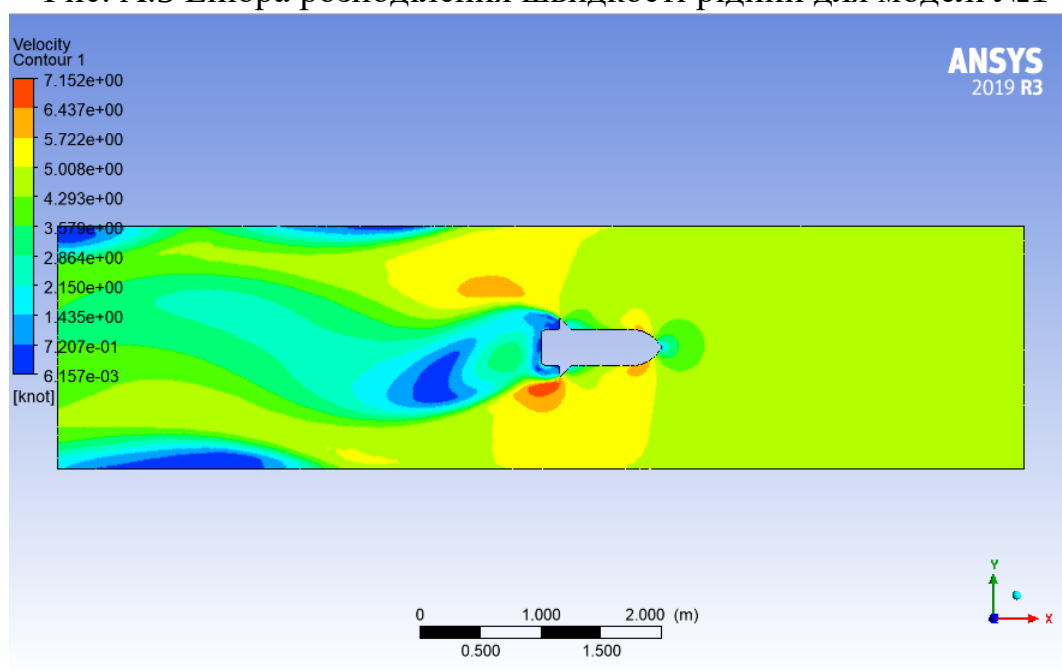


Рис. А.6 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №2

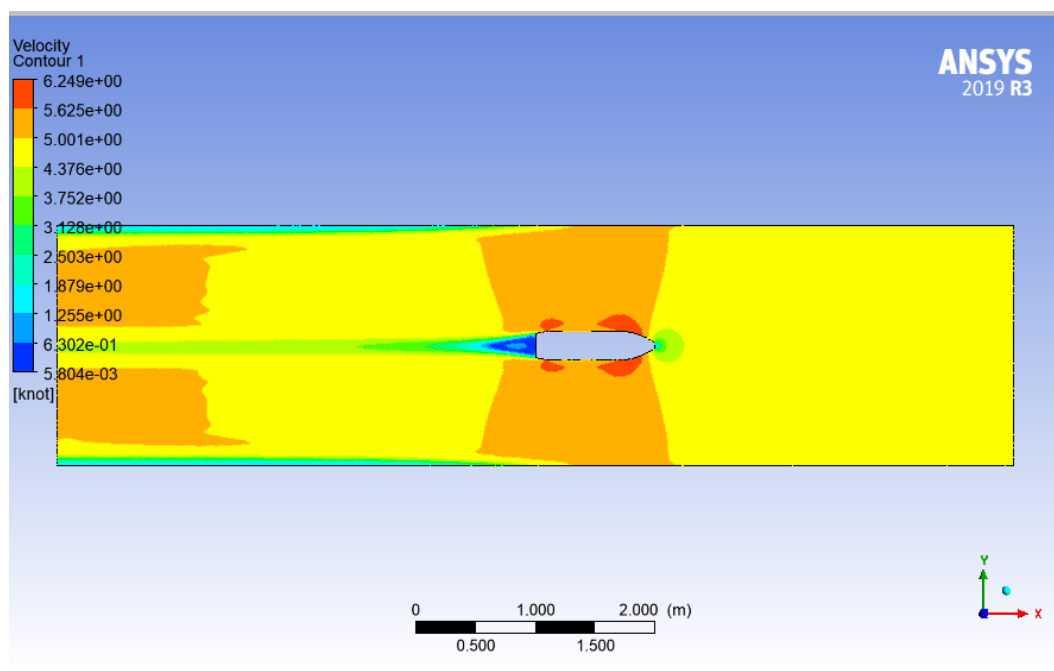


Рис. А.7 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №3

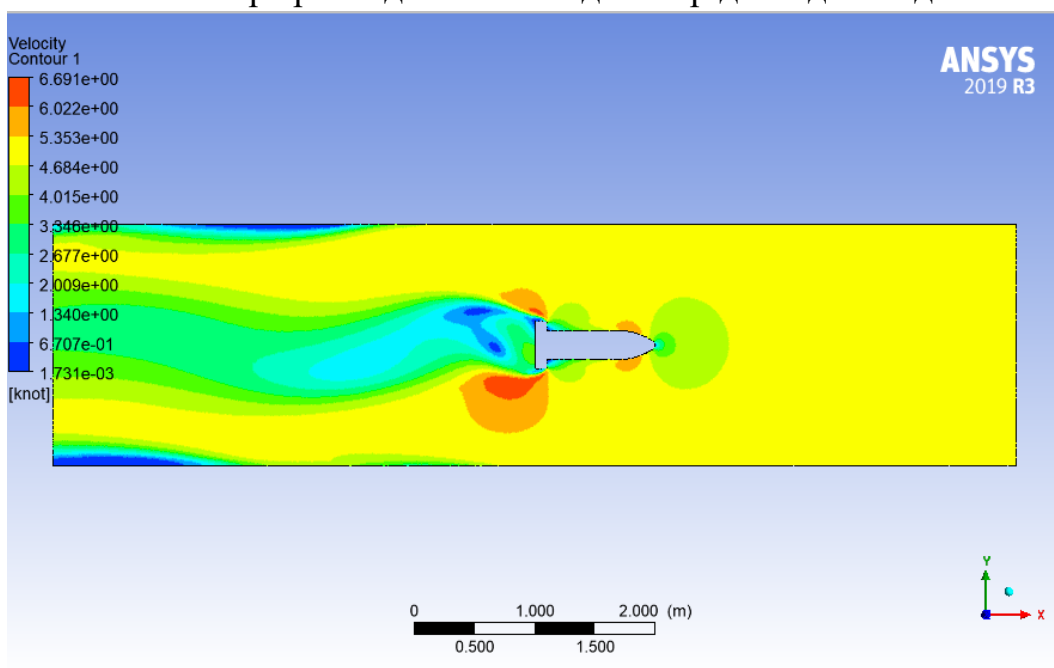


Рис. А.8 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №4

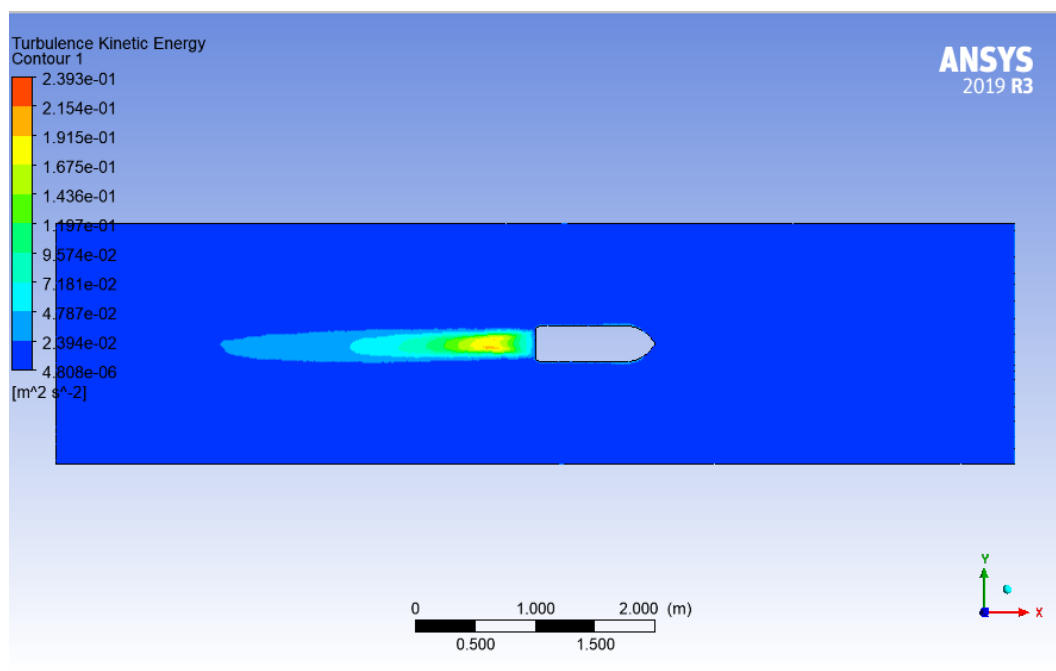


Рис. А.9 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №1

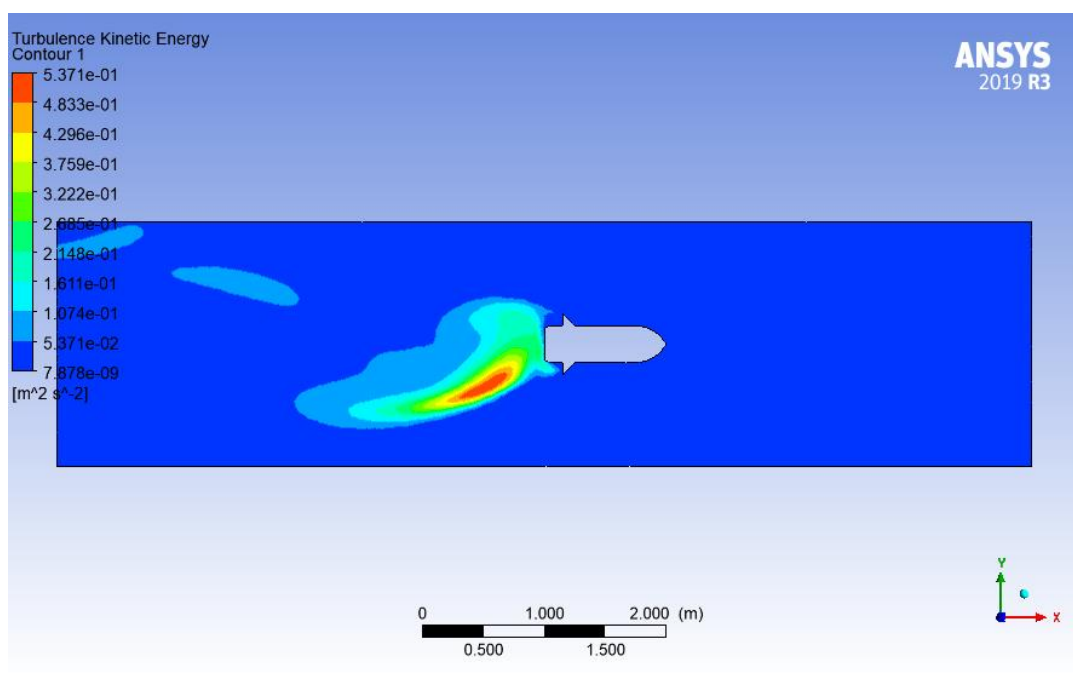


Рис. А.10 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №2

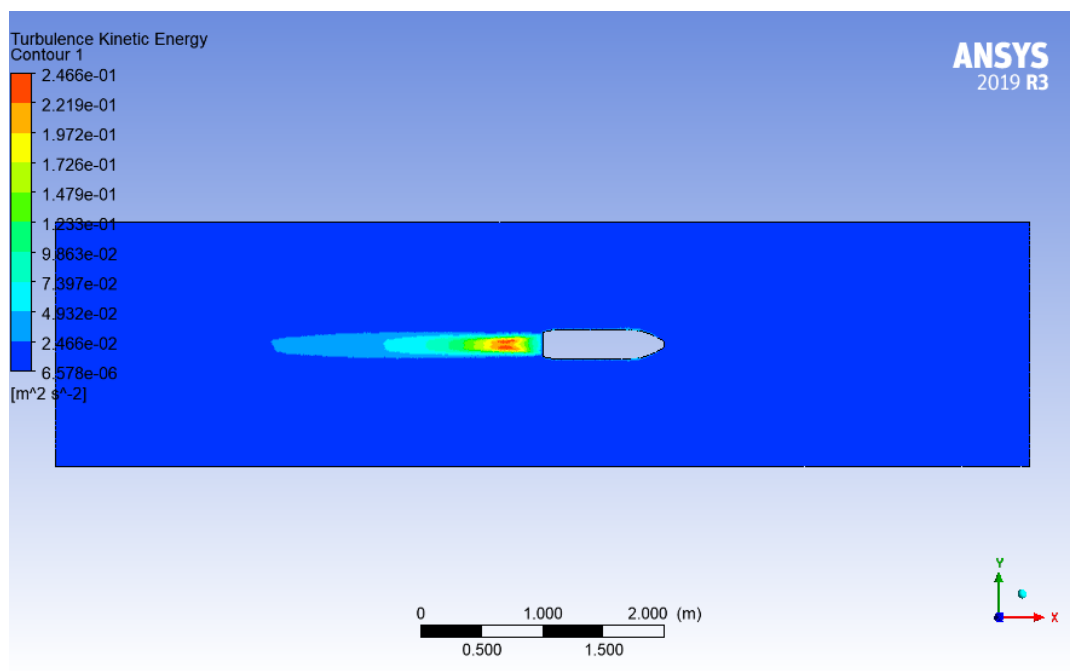


Рис. А.11 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №3

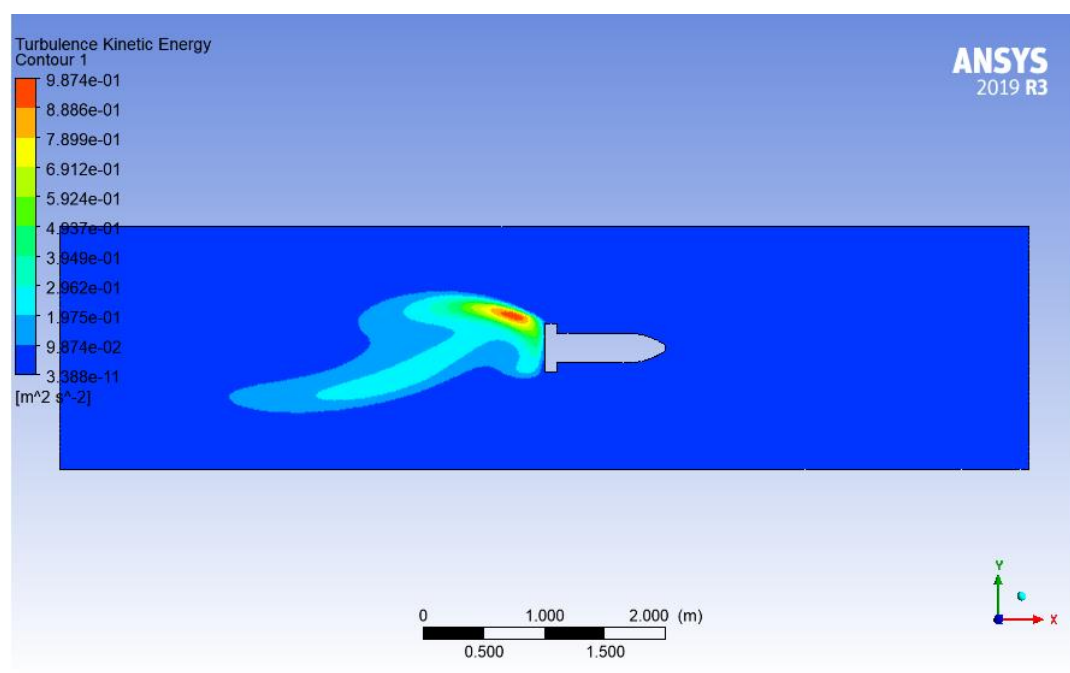


Рис. А.12 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №4

Епюра при швидкості по трьом осям (поздовжній – 7 м. вуз.,
вертикальний – 0.001 м. вуз., поперечний – 0.7 м. вуз.)

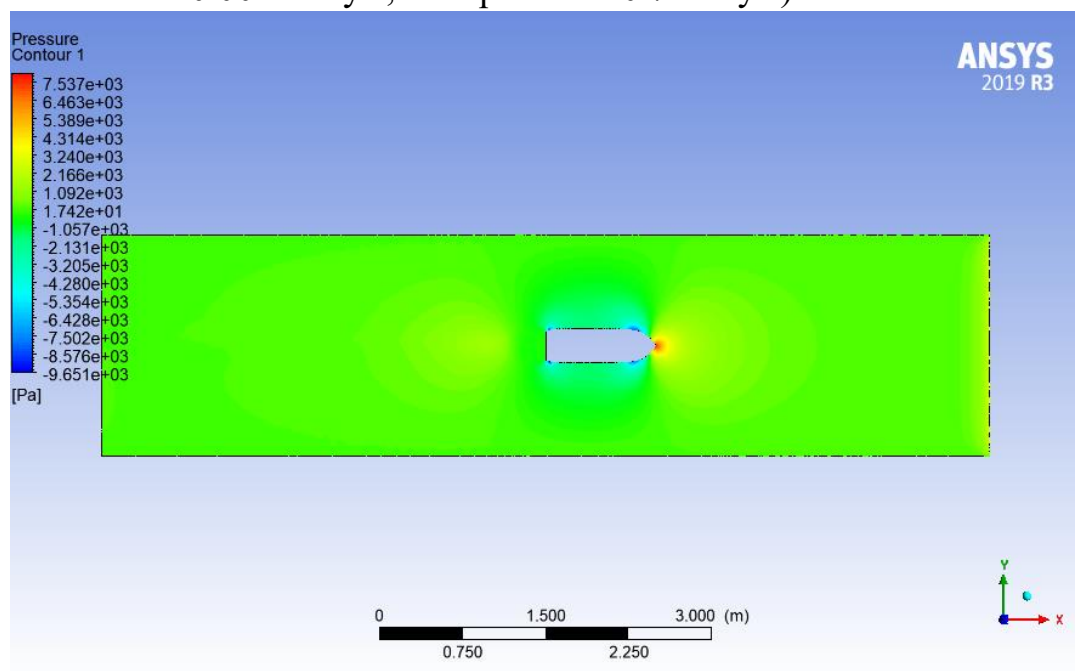


Рис. А.13 Епюра розподілення тиску для моделі №1

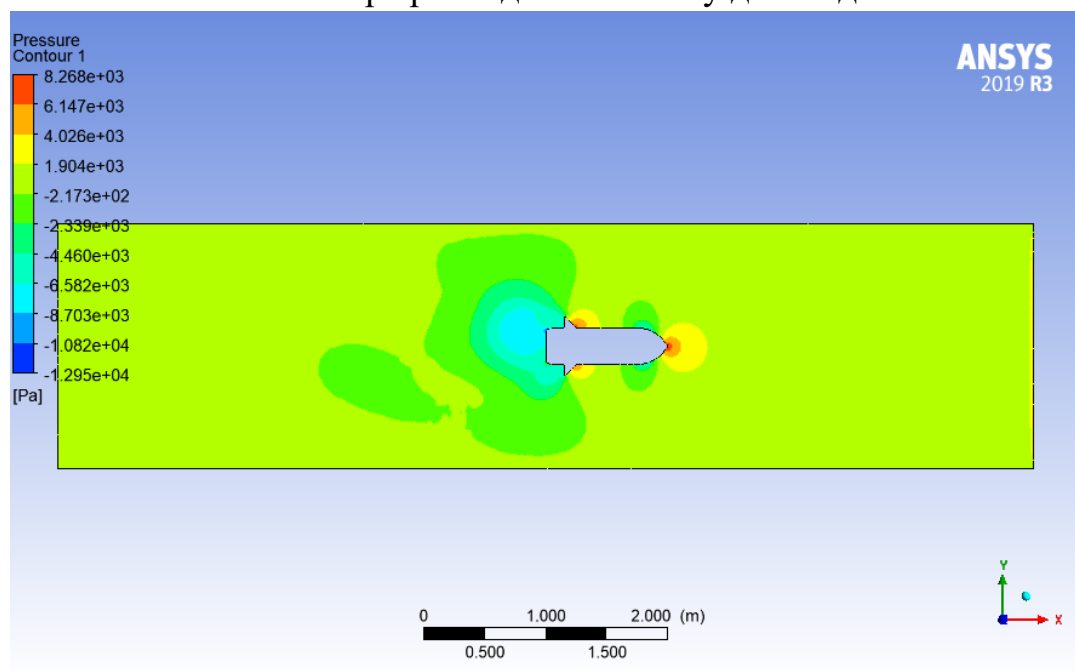


Рис. А.14 Епюра розподілення тиску для моделі №2

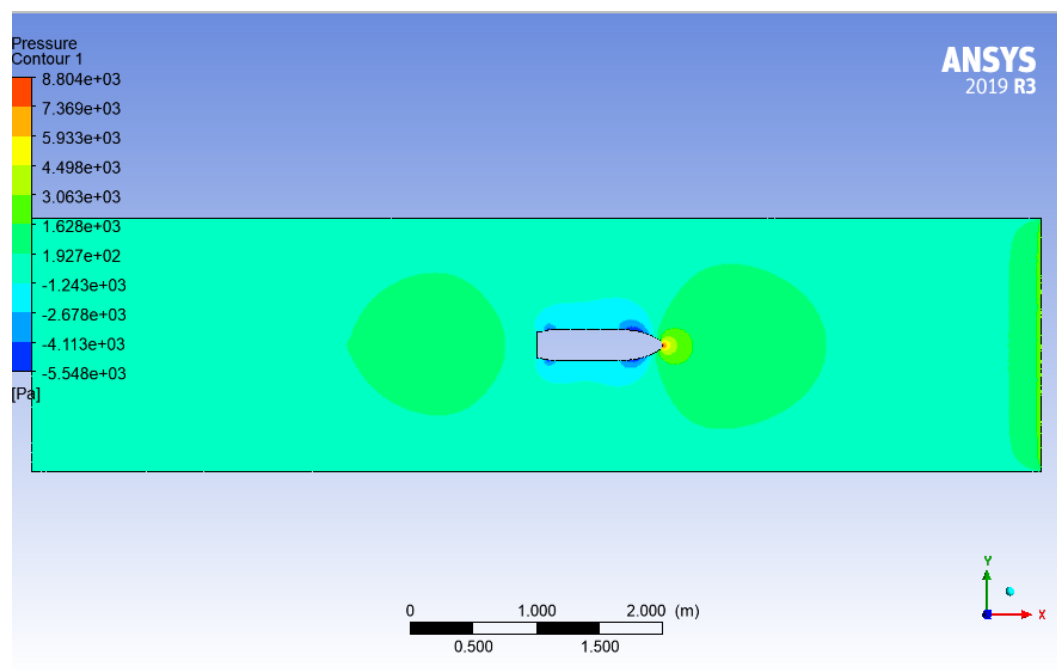


Рис. А.15 Епюра розподілення тиску для моделі №3

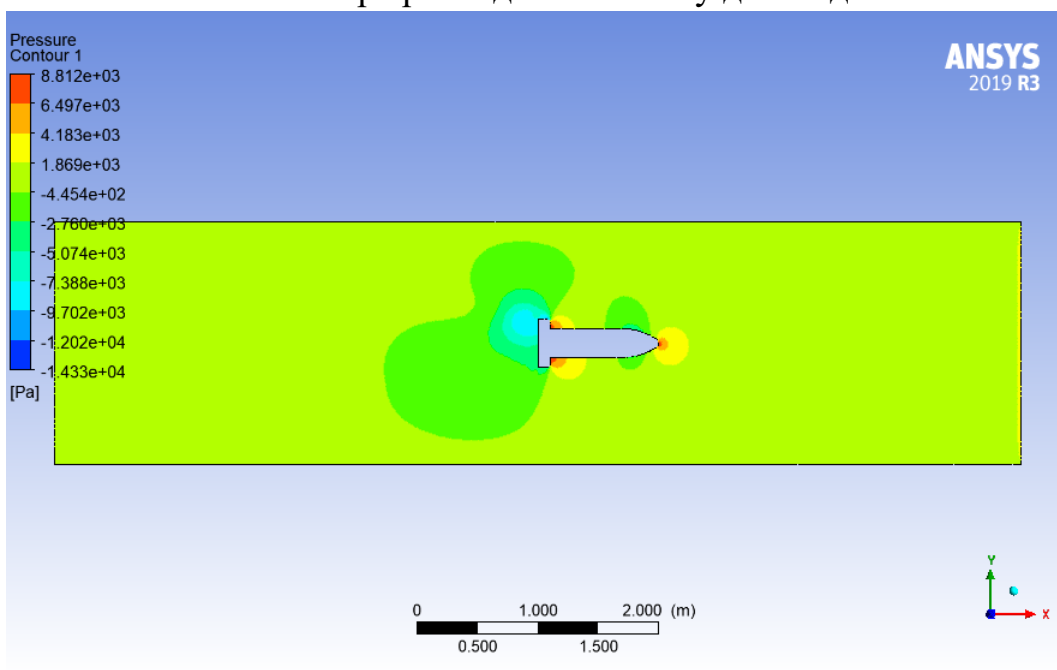


Рис. А.16 Епюра розподілення тиску для моделі №4

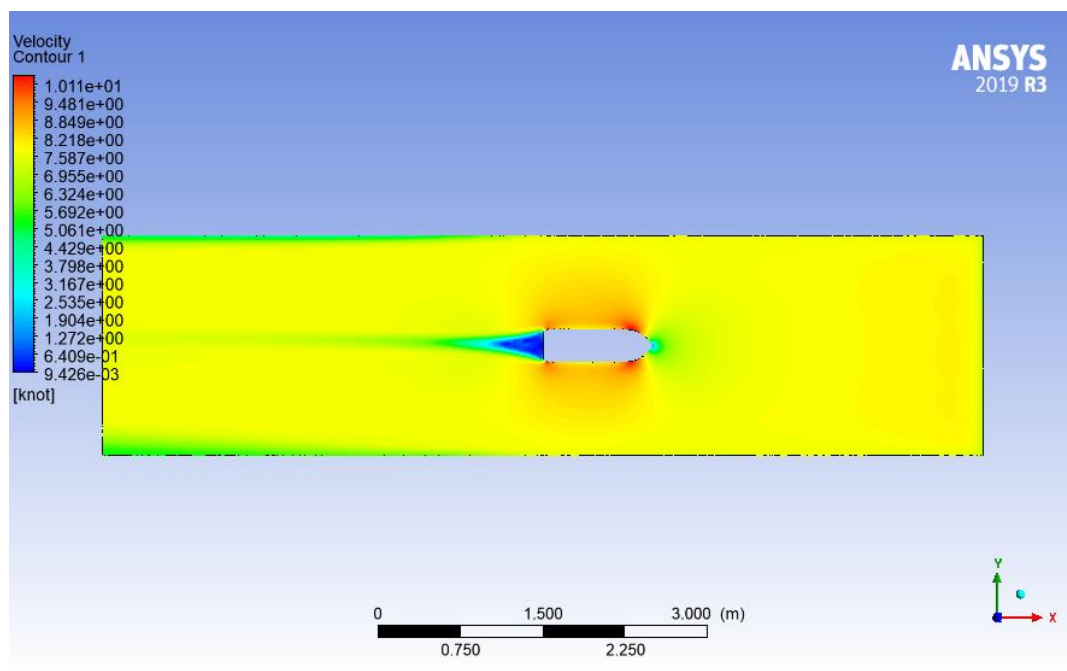


Рис. А.17 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №1

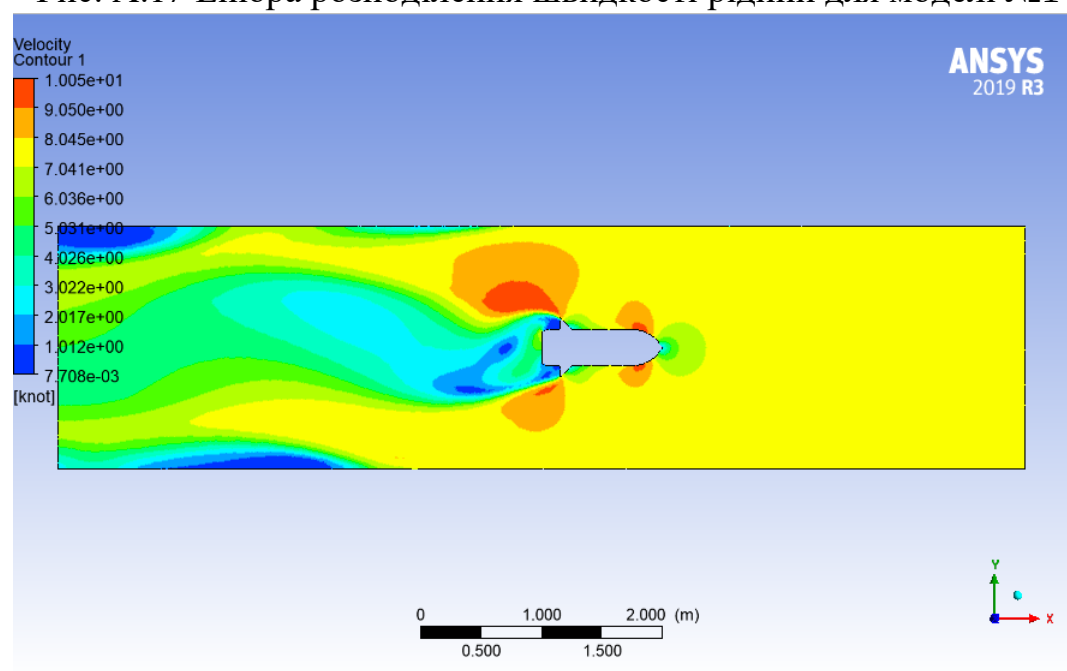


Рис. А.18 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №2

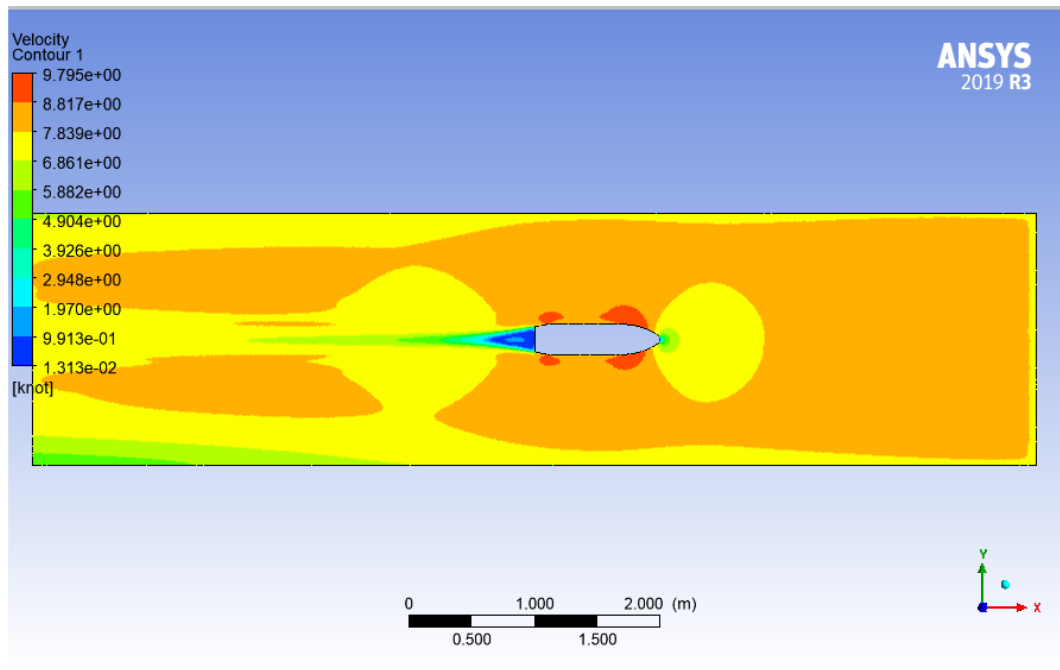


Рис. А.19 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №3

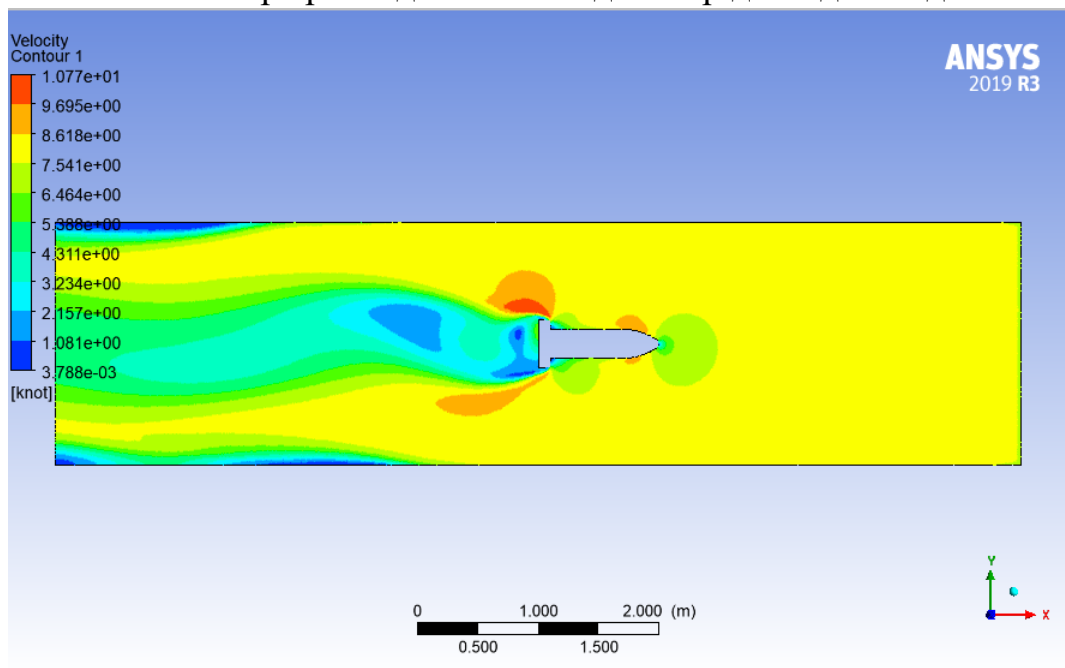


Рис. А.20 Епюра розподілення швидкості рідини для моделі №4

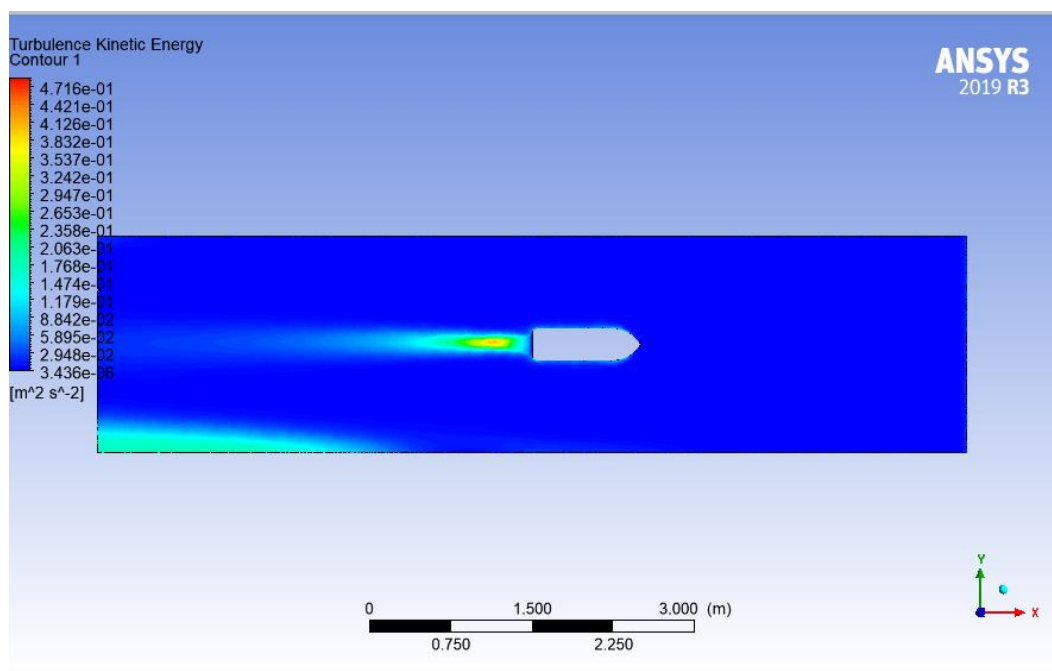


Рис. А.21 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №1

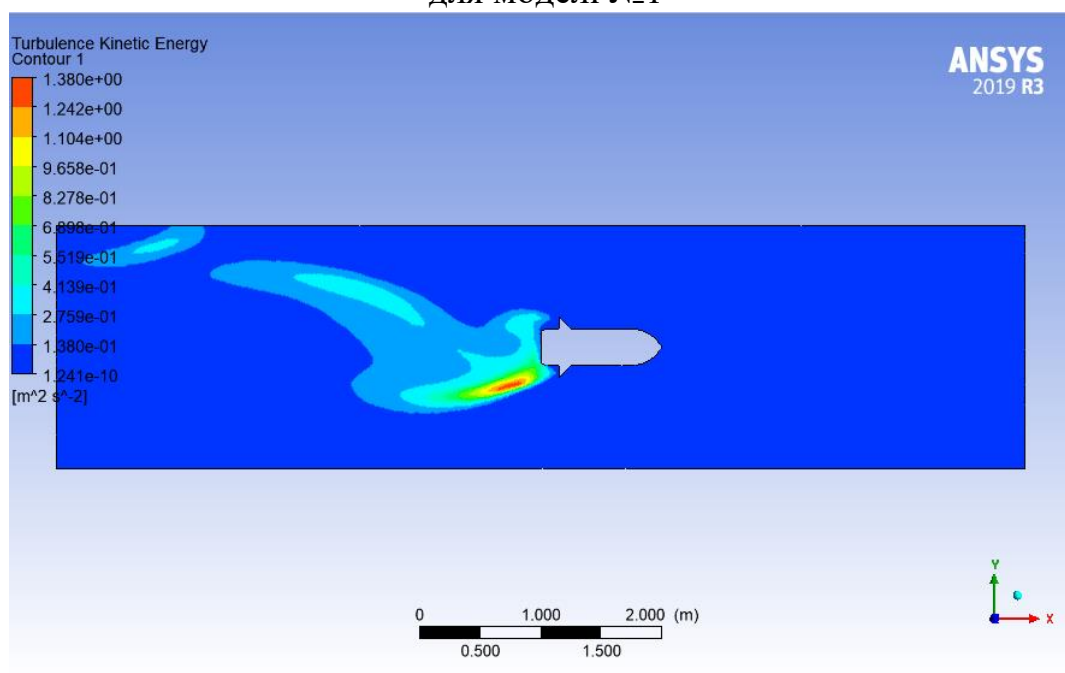


Рис. А.22 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №2

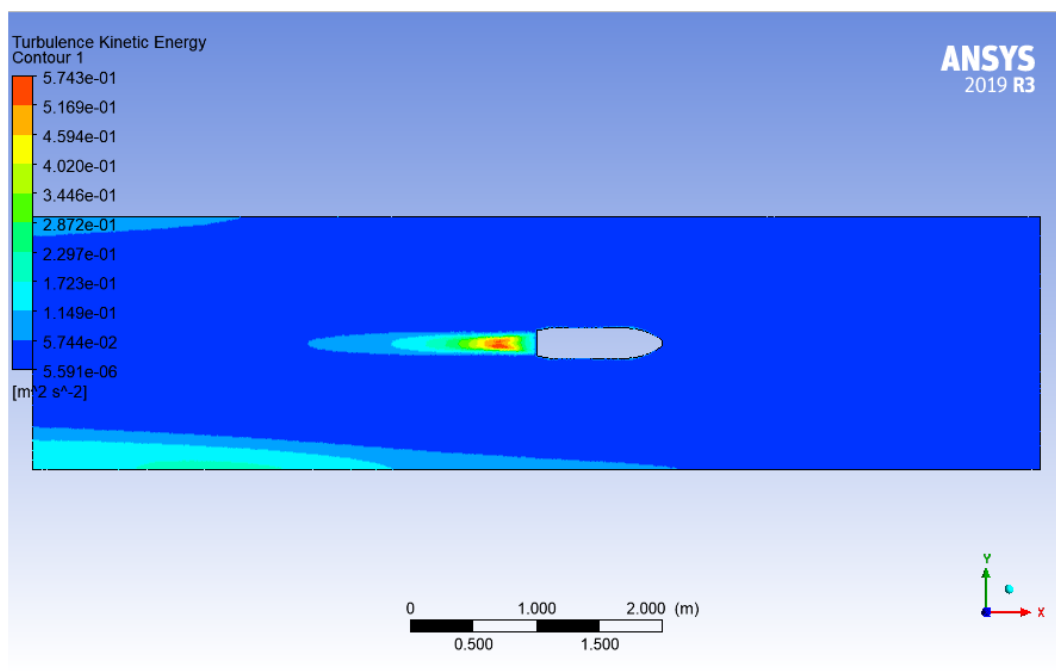


Рис. А.23 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №3

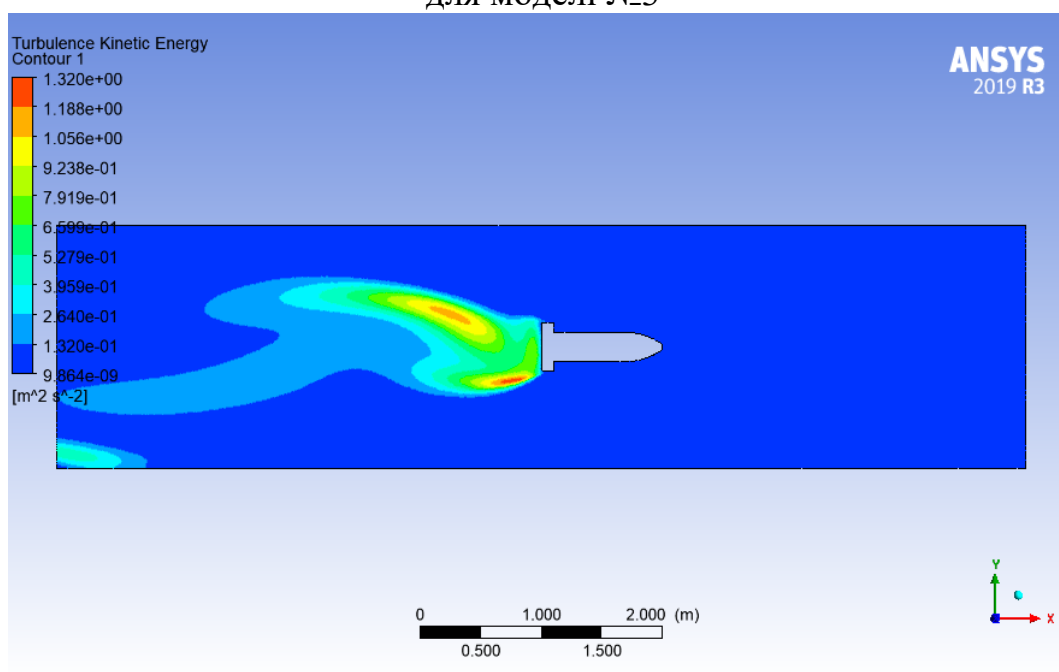


Рис. А.24 Епюра розподілення кінетичної енергії турбулентності для моделі №4