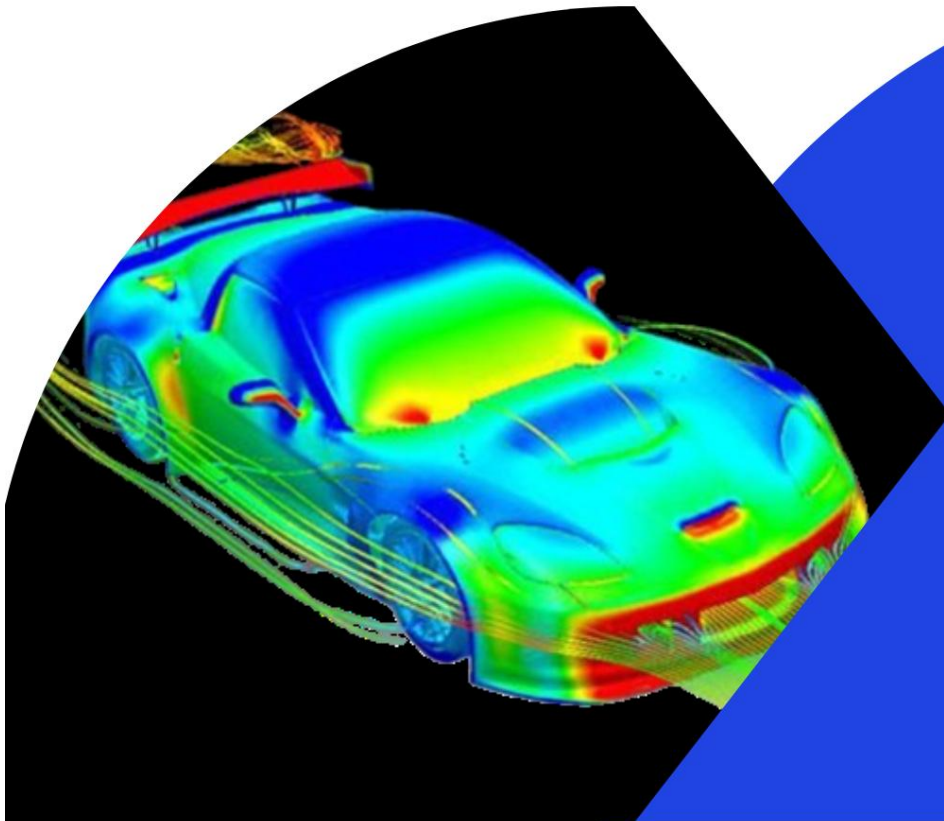


**Сергій Русанов
Олег Ключев
Владислав Проценко**



ХНТУ

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Навчально-методичний посібник
(лабораторний практикум)
для спеціальності «Автомобільний транспорт»**

Сергій РУСАНОВ
Олег КЛЮЄВ
Владислав ПРОЦЕНКО

**СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ
АВТОМОБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**
Навчально-методичний посібник (лабораторний практикум)
для спеціальності «Автомобільний транспорт»

Хмельницький – Херсон 2025

Русанов С. А., Ключев О. І., Проценко В. О.

Р 88 Системи автоматизованого проєктування автомобільних конструкцій. Навчально-методичний посібник (лабораторний практикум) для спеціальності «Автомобільний транспорт» / С. А. Русанов, О. І. Ключев, В. О. Проценко – Херсон : Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2025. – 111 с.

ISBN 978-617-8187-57-6 (електронне видання)

Лабораторний практикум призначений для студентів технічних ЗВО, зокрема для спеціальності І8 (274) – Автомобільний транспорт.

В практикумі наведено перелік лабораторних робіт, який починається зі знайомства з САД-системами та генераторами сіток. Далі наведено роботи з моделювання аеродинаміки автомобіля засобами CFD, нестационарної газодинаміки, застосування методу скінченних елементів для оцінки міцності та жорсткості на прикладі роботи в сучасних САЕ-системах з розрахунками конструктивних елементів автомобільної техніки.

Рецензенти:

Смирнов І. В. – д.т.н., проф., проф. кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Носов П. С. – к.т.н., доцент, зав. каф. суднових комп'ютерних систем та мереж Херсонської державної морської академії.

Затверджено на засіданні кафедри транспортних систем і технічного сервісу, протокол № 11 від 18 червня 2025 року.

Затверджено на засіданні Вченої ради факультету інженерії та транспорту Херсонського національного технічного університету, протокол № 7 від 19 червня 2025 року.

Затверджено на засіданні Вченої ради Херсонського національного технічного університету, протокол № 1 від 28 серпня 2025 року.

УДК 004.896

ВСТУП

Розвиток сучасної автомобільної галузі нерозривно пов'язаний із широким впровадженням цифрових технологій. Системи автоматизованого проєктування (САПР) стали невід'ємним сучасним інструментом, що забезпечує високу точність, гнучкість та ефективність всіх технічних рішень. Сучасні CAD (Computer-Aided Design) та CAE (Computer-Aided Engineering) системи є основою цифрового циклу і охоплюють усі ключові етапи — від створення концепції до експлуатації, технічного обслуговування і навіть маркетингової підтримки. Ці інструменти забезпечують комплексний підхід до проєктування, аналізу, випробувань, технічного обслуговування та візуалізації автомобільної продукції. Створена засобами CAD тривимірна модель є основою як дизайнерської роботи в галузі, так і проєктно-ремонтного напрямку, створення рекламного контенту. Задачі аеродинаміки автомобіля, що сьогодні легко вирішуються засобами CFD (Computational Fluid Dynamics — комп'ютерна гідрогазодинаміка), дозволяють моделювати й аналізувати поведінку потоків повітря й рідин у різноманітних умовах — як навколо автомобіля, так і всередині його систем. Метод скінченних елементів (МСЕ) є базовим інструментом аналізу, який дозволяє точно й ефективно оцінювати міцність, жорсткість та надійність конструктивних елементів. У сучасних умовах, коли автомобілі стають легшими, безпечнішими, економічнішими та одночасно складнішими з точки зору конструкції, застосування МСЕ є критично важливим. Окремим застосуванням МСЕ може слугувати його застосування для аналізу та експертизи ДТП та проведення віртуальних краш-тестів.

Ці методичні вказівки призначені для практичного засвоєння основних принципів роботи із сучасними САПР, а також застосування спеціалізованих програмних комплексів для моделювання фізичних процесів у складних технічних системах. У межах курсу передбачено виконання десяти лабораторних робіт, які охоплюють ключові етапи створення цифрового двійника конструкції — від побудови геометричної моделі до аналізу її поведінки в різних експлуатаційних умовах.

Перший блок робіт присвячений знайомству з CAD-системами та практиці побудови тривимірних моделей елементів і вузлів. Наступні роботи зосереджені на генерації сіток скінченних елементів, що є основою для проведення чисельного аналізу. Окремий блок робіт присвячено задачам аеродинаміки автомобіля, що розв'язуються за допомогою методів обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD). У лабораторних завданнях розглядаються як стаціонарні, так і нестаціонарні задачі. Особливу увагу приділено застосуванню методу скінченних елементів (МСЕ) для вирішення задач напружено-деформованого стану з використанням як об'ємних, так і плоских елементів, в тому числі для аналізу міцності елементів автомобільних конструкцій.

Наведені матеріали спрямовані на формування практичних навичок використання сучасного програмного забезпечення та поглиблення розуміння міждисциплінарних підходів при моделюванні складних механічних систем.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Твердотільні моделі в CAD-системах. Загальні принципи

1.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок твердотільного моделювання й імпорту-експорту між САПР програмами.

Задача роботи — формування твердотільної моделі використовуючи принципи ескізного моделювання, операцій замітання й накладення зв'язків на елементи моделі.

1.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.2.1. Сучасне твердотільне моделювання. Загальні принципи. Ядро CAD-системи

Комп'ютерна графіка сьогодні відіграє ключову роль у конструкторських розробках, які розвиваються у двох основних напрямках. Перший базується на використанні двовимірних геометричних моделей. У цьому випадку комп'ютер служить ефективним інструментом для прискорення процесу проєктування й покращення якості оформлення креслень. Основною складовою такого підходу є креслення, яке вміщує всю необхідну інформацію для виготовлення виробу та є невід'ємною частиною конструкторської документації.

Другий напрямок орієнтований на просторові (тривимірні) геометричні моделі, які надають більш наочне представлення об'єкта і значно полегшують вирішення просторових задач. Тут креслення має допоміжний характер і створюється за допомогою інструментів комп'ютерної графіки. Тривимірна модель не лише забезпечує візуалізацію, а й стає основою для комплексного процесу проєктування. Після створення об'ємної моделі вона проходить етапи аналізу міцності, теплопередачі, динаміки, оптимізації конструкції, технологічної підготовки виробництва, моделювання лиття та ін. У результаті автоматично формуються креслення, інструкції для верстатів з ЧПК та інша необхідна документація. Окрім того тривимірна модель є основою для прийняття дизайнерських та маркетингових рішень. Таким чином, тривимірна модель перетворюється на ключовий елемент всього проєктного процесу.

Під *геометричним моделюванням* розуміється процес створення моделей геометричних об'єктів, які точно описують їхню форму і розміри. Наприклад, відрізок можна описати координатами його крайніх точок, а коло — координатами центру та значенням радіуса. Такі базові об'єкти, які часто називають примітивами, формують основу побудови складніших моделей і закладені в ядра CAD-програм.

Двовимірні геометричні моделі дозволяють створювати креслення, тоді як тривимірні використовуються для просторового представлення об'єктів. Існує кілька видів 3D-моделей: *каркасні* — задаються лише вершинами і ребрами; *полігональні (поверхневі)* — описуються поверхнями; *твердотільні* — створюються з базових тіл за допомогою логічних (булевських) операцій (об'єднання, перетин, віднімання). Останні дають змогу не лише візуалізувати об'єкт, а й виконувати розрахунки його масо-інерційних характеристик, якщо врахувати фізичні властивості матеріалу.

Твердотільне моделювання стало основою сучасних CAD-систем, які забезпечують можливість створення складних деталей і збірок. Процес віртуального моделювання імітує реальні виробничі операції. Під час складання деталей у єдину конструкцію можна виконувати розрізи, приховувати окремі елементи тощо. При цьому тривимірна модель пов'язана з кресленнями: зміни в моделі автоматично відображаються в пов'язаних кресленнях. Сучасні системи також підтримують параметричне моделювання, що

дозволяє створювати взаємозалежні елементи, наприклад, деталь і відповідні матрицю з пуансоном для штампування. Зміни в моделі деталі спричиняють автоматичні зміни в супутніх елементах і документації.

До CAD/CAM-систем високого рівня належать такі продукти як **Pro/Engineer**, **Unigraphics (NX)**, **CATIA**, **EUCLID**, **I-DEAS**. Усі вони мають потужні модулі інженерного аналізу (CAE). Найпоширенішими геометричними ядрами для створення твердотільних моделей є **Parasolid** (Unigraphics Solutions) та **ACIS** (Spatial Technology). На основі ядра ACIS функціонують середньорівневі системи: **Cimatron**, **Mastercam**, **AutoCAD**, **Mechanical Desktop**, **Autodesk Inventor**, **Powermill**, **Bravo**, **Ironcad** та інші. На базі ядра **Parasolid** працюють такі системи, як **SolidWorks**, **Solid Edge**, **CADKEY**, **Pro/Desktop**, **Microstation Modeler**, **Anvil Express**, **NX** тощо.

CAD-системи нижнього рівня, такі як **AutoCAD LT**, **Medusa** або **Truecad**, в основному використовуються для автоматизації рутинних креслярських задач без широких можливостей 3D-моделювання.

1.2.2. Побудова твердотільних моделей у сучасних CAD-системах на прикладі роботи в Solidworks

SolidWorks була розроблена як система твердотільного параметричного моделювання. Вона оснащена широким набором інструментів, з яких деякі особливо ефективні для створення моделей, що орієнтовані на подальше використання в інженерних розрахунках. Зокрема, мова йде про проектування виробів із листового металу та зварних конструкцій, які можна моделювати з високою точністю відповідно до вимог розрахункових програм.

Окремий набір функцій призначений для роботи з криволінійними формами: доступні інструменти створення сплайнів, побудови тіл із криволінійними поверхнями, елементи згладжування і формування плавних переходів. Це дає змогу створювати моделі, придатні для аналізу у завданнях аерогідродинаміки або світлотехніки. У задачах розрахунку на міцність точність опису поверхонь не настільки критична, але вона теж враховується.

Починаючи з версії 2003, у SolidWorks з'явилася підтримка багатотільного моделювання, що значно розширило можливості побудови складних геометричних об'єктів. Водночас, не всі системи розрахунку на той момент підтримували роботу з багатьма тілами одночасно. У SolidWorks можна створювати різні конфігурації моделей, а більшість інтегрованих модулів коректно їх опрацьовують, дозволяючи проводити аналіз кількох варіантів одного об'єкта. Наприклад, система **CosmosWorks** (починаючи ще з версії 2005) здатна паралельно відображати результати декількох розрахункових сценаріїв.

Завдяки параметричному опису геометрії, CosmosWorks інтегрував модулі оптимізації конструкцій, а також сценарії проектування, які дозволяють досліджувати, як зміна форми, матеріалу або граничних умов впливає на характеристики виробу. Щодо матеріалів, варто відзначити, що один з напрямків розвитку SolidWorks полягає у розширенні можливостей візуального та фізичного опису матеріалів. Інтегрована база даних матеріалів містить не лише колір, прозорість і текстуру, а й такі характеристики, як густина, пружність та міцність.

1.2.3. Основні елементи інтерфейсу

Основний тип документа, створюваний в **Solidworks**, — це електронна версія тривимірного зображення деталі, результат побудови якої контролюється по ізометричному зображенню в робочому вікні.

Для роботи в режимі об'ємного твердотілого моделювання необхідно створити новий документ **New Document** натисканням кнопки **Нова деталь (Part)**.

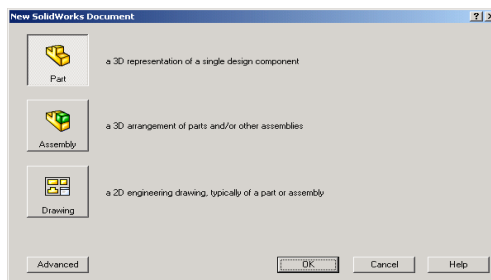


Рис. 1.1. Створення нової деталі.

Інтерфейс головного вікна в режимі об'ємного моделювання представлений на рисунку нижче.

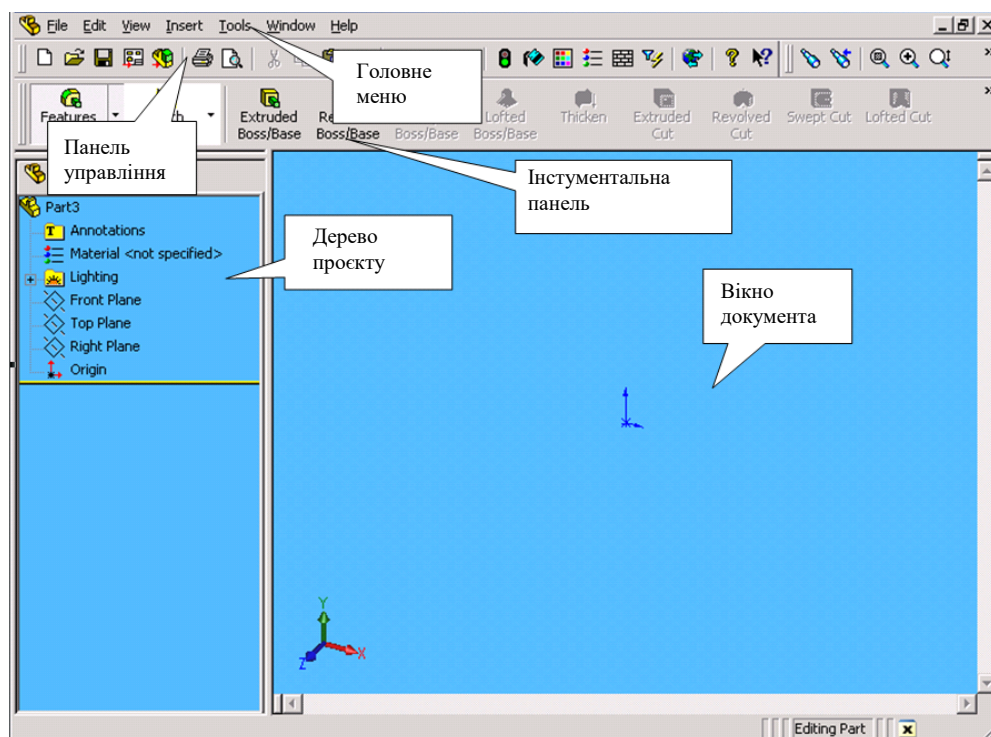


Рис.1.2. Інтерфейс головного вікна.

Розглянемо докладніше окремі елементи інтерфейсу головного вікна.

Рядок меню, що перебуває у верхній частині вікна під заголовком, по виду не відрізняється від рядка меню при плоскому моделюванні.

Команди, що зберігаються в кожному з меню, різняться суттєво й будуть розглянуті пізніше.

На панелі керування, рис. 1.3, що розташована під рядком меню, розміщені кнопки, що дозволяють звертатися до найбільш часто використовуваних команд.

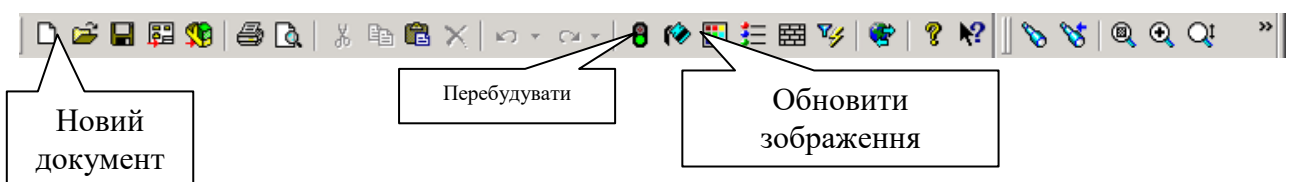


Рис. 1.3. Панель керування.

Більшу частину головного вікна займає **Вікно документа**, у якому розміщається зображення відкритої деталі, у ньому виконуються всі операції по побудові й редагуванню моделі.

У **Дереві побудови** представляється послідовність операцій формування моделі й відображаються: найменування деталі, площини, у яких будуються ескізи для формування елементів деталі, символ початку координат, самі ескізи, рис. 1.4.

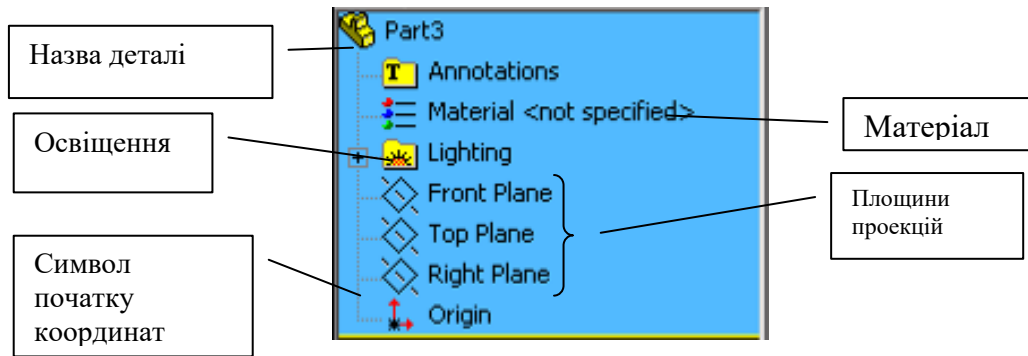


Рис. 1.4. Дерево побудови (дерево проєкту).

Інструментальна панель за замовчуванням розташована у верхній частині головного вікна й складається з декількох сторінок. Для перемикання між сторінками використовуються кнопки **Панелі перемикавання**, розташовані на початку **Інструментальної панелі**, рис. 1.5.

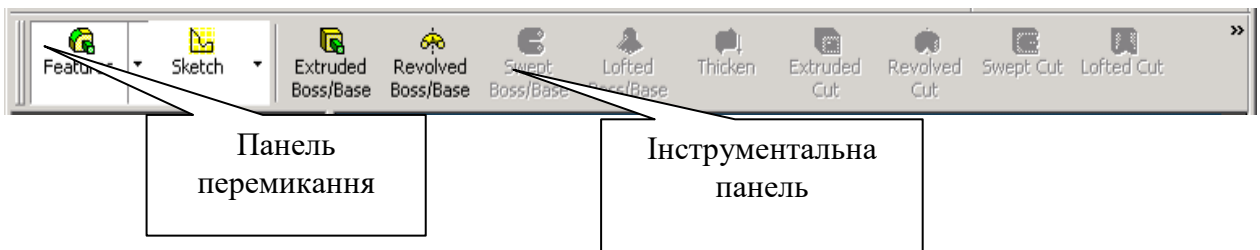


Рис. 1.5. Панель перемикавання й інструментальна панель.

На інструментальній панелі деякі кнопки згруповані по варіантах можливого виконання. Для одержання доступу до інших команд треба клацнути на наявній на панелі кнопці з невеликим трикутником у правому нижньому куті й не відпускати її якийсь час. З появою панелі розширених команд, пов'язаних з даною кнопкою, треба встановити курсор на потрібну кнопку й відпустити клавішу миші.

Необхідно знати, що операції інструментальної панелі дублюються в закладках головного меню **Insert** і **Tools**, крім того, можливе винесення часто вживаних операцій в окремі позиції інтерфейсу (рис. 1.6).

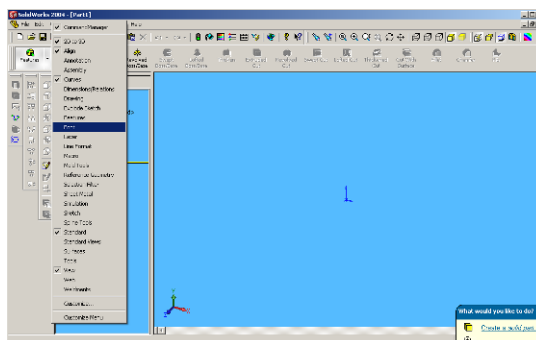


Рис. 1.6. Позиції інтерфейсу, що настраюється.

1.2.4. Керування зображенням моделі

Система **Solidworks** дозволяє управляти масштабом зображення моделі на екрані, переміщати й повертати зображення, вибирати різні варіанти її відображення.

Команди керування зображенням зібрані в меню **Головне Меню/View/Modify/Orientation** (це ж меню може бути викликане шляхом натискання правої кнопки миші на вікні документа, або простим натисканням клавіші **пробіл**).

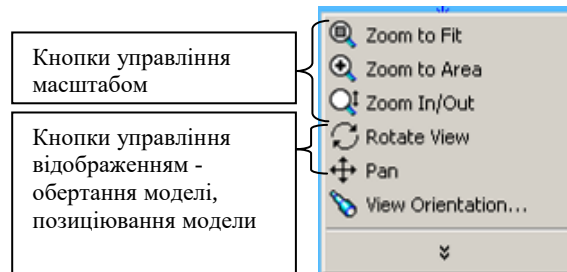


Рис. 1.7. Команди керування зображенням.

Після відкриття документа або в процесі роботи над ним буває необхідно показати його повністю у вікні. При натисканні кнопки **Показати все** система автоматично підбере максимально можливий масштаб відображення, при якому вся модель відобразиться у вікні документа.

Кнопкою **Наблизити/віддалити** можна плавно міняти масштаб зображення, наближаючи або віддаляючи його щодо точки, у якій була натиснута кнопка миші.

Зрушення зображення у вікні виконується командою **Зрушити зображення**, включенням кнопки .

Зручно переглядати модель, обертаючи її в будь-якому напрямку, можна використовуючи кнопку **Повернути** .

Кнопки дозволяють застосовувати команди керування відображенням моделі в режимах: **Каркас**, **Без невидимих ліній**, **Невидимі лінії тонкі**, **Півтонове** й **Перспектива**.

Модель можна розташувати таким чином, щоб її положення щодо трьох площин проекцій відповідало стандартним видам: попереду, зверху, ліворуч, праворуч, позаду й знизу. Для одержання потрібної орієнтації моделі треба клацнути мишею на команді орієнтація видів **Головне Меню/View/Modify/Orientation** і вибрати зі списку потрібну проекцію.

Система **Solidworks** дозволяє розташувати паралельно екрану яку-небудь грань моделі, або побудовану користувачем допоміжну площину. Для цього треба клацанням миші вказати цю грань або допоміжну площину, а потім указати зі списку рядок **Нормально до... (Normal To)**.

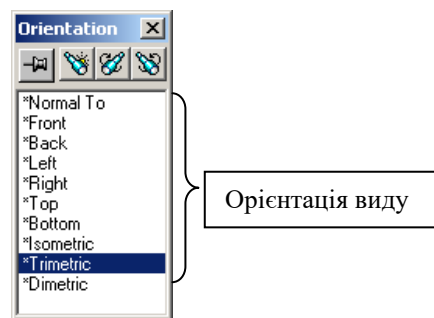


Рис. 1.8. Команди розташування відносно екрану.

1.2.5. Побудова твердотільних моделей у сучасних CAD-системах на прикладі роботи в FreeCAD

FreeCAD — це універсальний параметричний 3D-моделер для автоматизованого проєктування (CAD) та програмне забезпечення для інформаційного моделювання будівель (BIM) з підтримкою методу скінченних елементів (FEM). Програма призначена для проєктування виробів машинобудування, але також розширюється на ширший спектр використання в інженерії, такий як архітектура чи електротехніка. FreeCAD є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, за ліцензією LGPL-2.0 або пізнішої версії, і доступний для операційних систем Linux, macOS та Windows. Користувачі можуть розширювати функціональність програмного забезпечення за допомогою мови програмування Python.

Основні принципи роботи в FreeCAD збігаються з принципами роботи в SolidWorks.

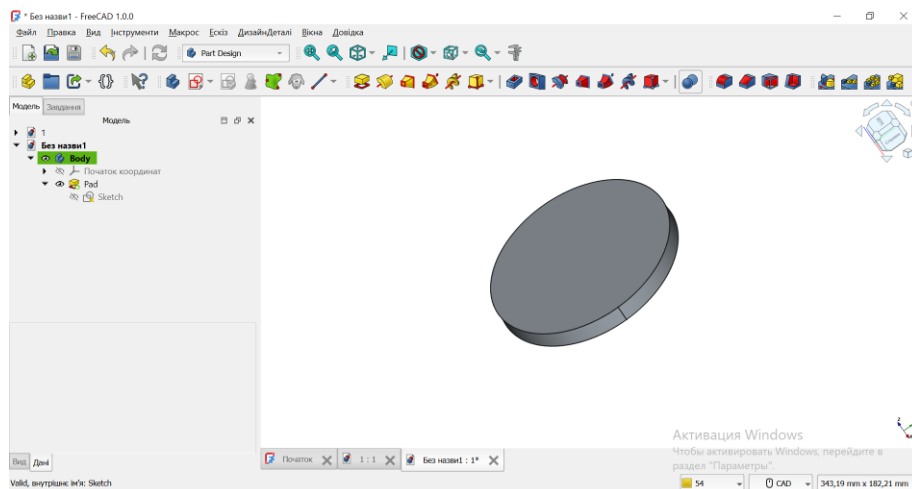
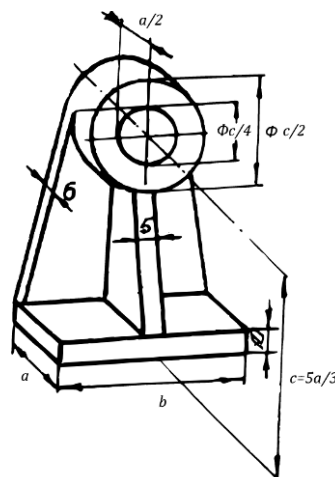


Рис. 1.9. Інтерфейс системи FreeCAD.

Твердотільне моделювання також здійснюється за рахунок створення двовимірних об'єктів в ескізах (Sketch) та створення 3D об'єктів видавлюванням (прямолінійним замітанням, обертанням та ін.).

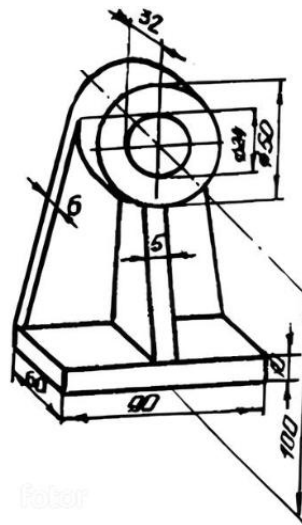
1.3. ЗАВДАННЯ

Побудувати деталь, що вказана на рисунку нижче.



1.4. Приклад виконання завдання в системі Solidworks

За допомогою системи твердотілого моделювання необхідно створити об'ємну модель зазначеної нижче деталі:



Для створення твердотілової моделі застосовується переміщення або обертання плоских контурів. Плоский контур, у результаті переміщення якого утворюється об'ємне тіло-модель, є проекцією моделі або її елемента на площині проекцій, або на грань моделі. Те або інше переміщення контуру прийнято називати *операцією замітання*. Операції мають додаткові можливості, що дозволяють змінювати параметри побудови, а отже й самої моделі. У контур можна скопіювати зображення з раніше створеного креслення або фрагмента.

Створення об'ємної моделі починається з побудови плоского контуру, на одній зі стандартних площин проекцій. Побудова плоского контуру ведеться в редакторі ескізів (**Sketch** — елемент інструментальної панелі, див. вище)

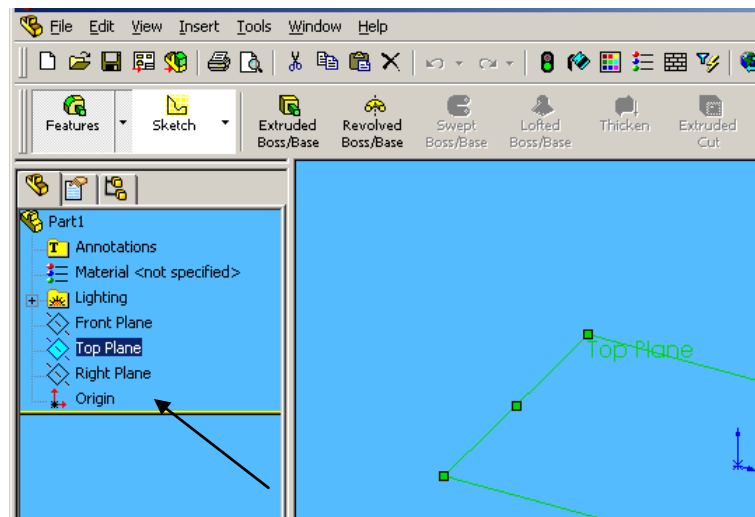
Система **Solidworks** визначає ряд вимог до побудови контуру:

- контур завжди відображається стилем лінії **Основна**;
- контури, що відображають креслення основи моделі не повинні перетинатися й не повинні мати загальних точок;
- якщо контурів замало, то один з них повинен бути зовнішнім, а інші — вкладеними в нього;
- допускається тільки один рівень вкладеності контурів.

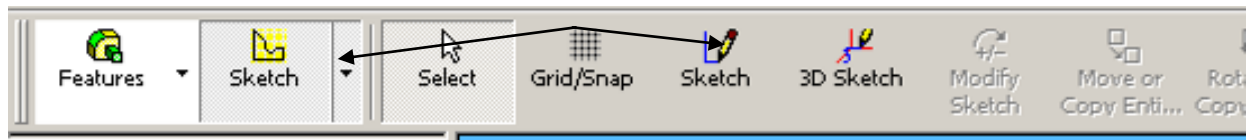
Для створення документа необхідно натиснути кнопку **Нова деталь (Part)** або виконати команду **Головне меню / File / New – Part**.

У головному вікні **Solidworks** з'явиться вікно документа з деревом побудови й назвою нової деталі (моделі) — **Part1**. Відразу ж можна перезберегти деталь під більш зручною назвою.

1.4.1. Побудова моделі починається з побудови контуру підставки 60x90 мм. Активізуємо клацанням миші в дереві побудови горизонтальну площину проекцій (**Top Plane**).

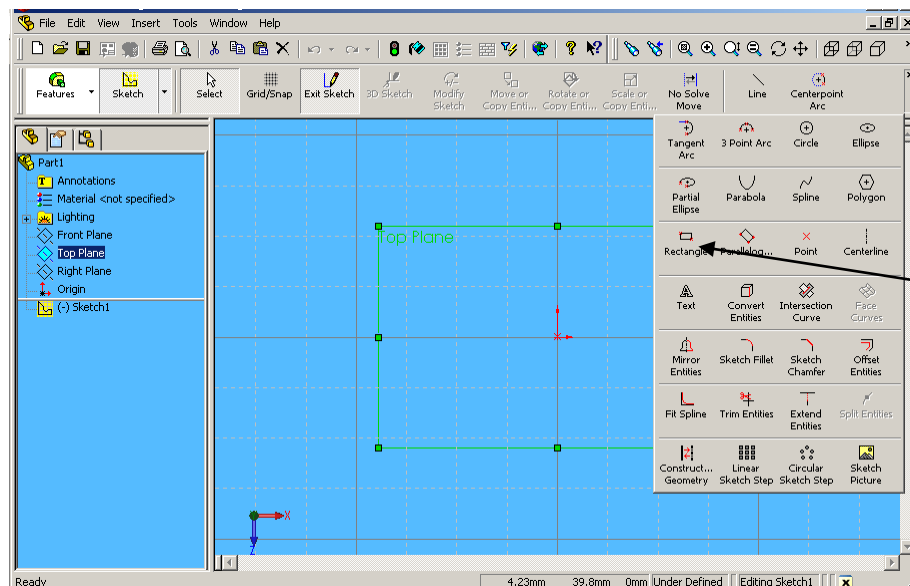


1.4.2. У панелі перемикавання натиснути кнопку **Sketch (Ескіз)** і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку:

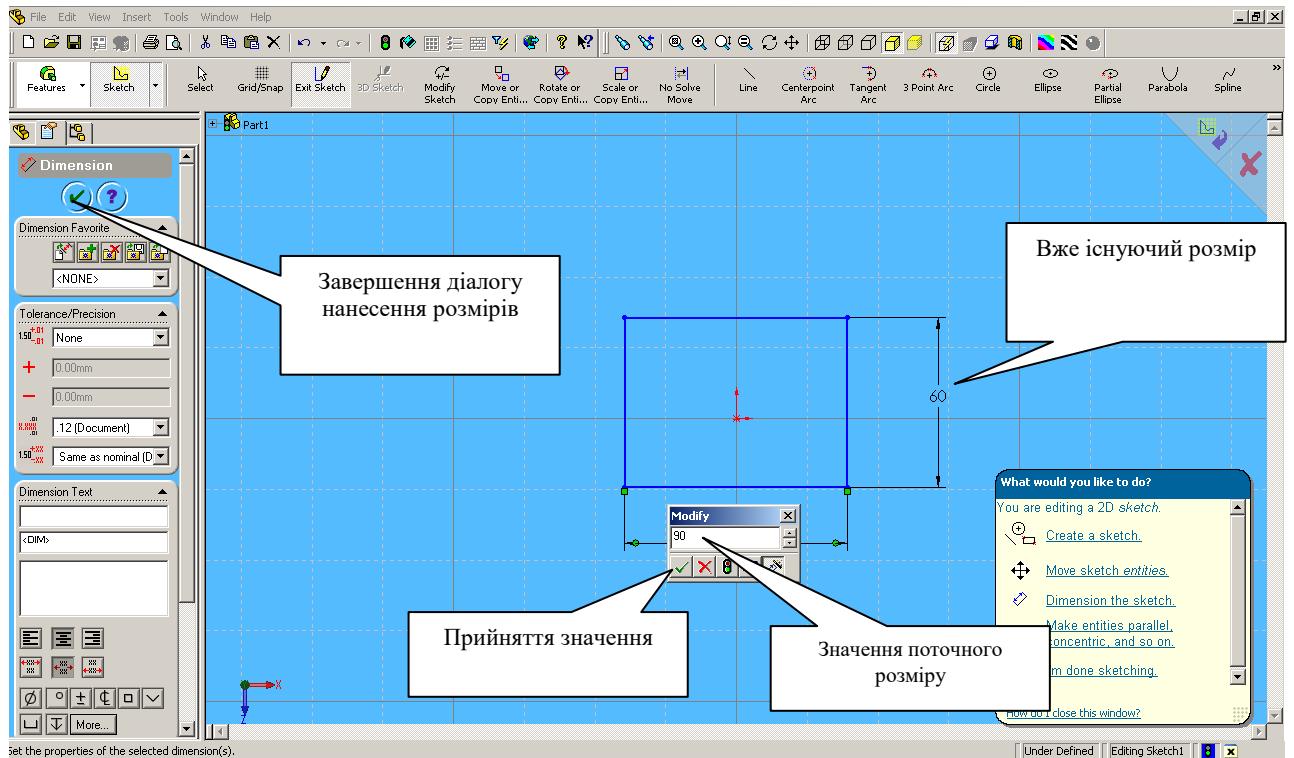


Система перейде в режим побудови й редагування контуру основи. При цьому міняється набір кнопок на Панелі керування й на Інструментальній панелі. Площина автоматично повернеться перпендикулярно до екрана.

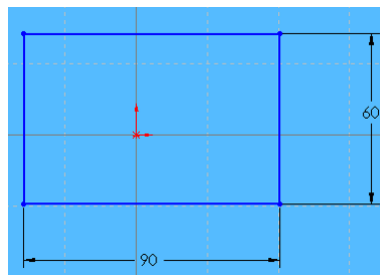
1.4.3. Побудуємо прямокутник 60x90. Для цього в інструментальній панелі ескізу (попередньо розширивши її значком >>) виберемо побудову прямокутника **Rectangle**:



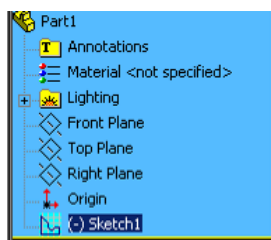
За допомогою покажчика, що з'явився, створимо попередній прямокутник з довільними розмірами, і натиснемо клавішу Esc. Далі нанесемо розміри основи: **Головне меню / Tools / Dimensions**, послідовно виберемо вертикальний (**Vertical** — і вказуємо вертикальну сторону рівної 60 мм) і горизонтальний (аналогічно — **Horizontal** — 90 мм) розміри й проставимо їхній значення (після вказівки відповідного розміру необхідно прийняти зміни й завершити діалог нанесення розмірів, див. рисунок нижче):



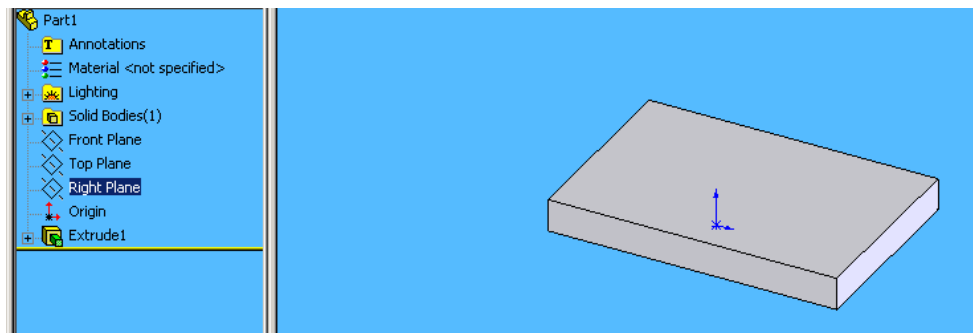
У результаті одержимо наступну картину:



Після зазначених операцій завершимо редагування поточного ескізу , у дереві проектування при цьому з'явиться ескіз із привласненим йому назвою **Sketch1**:

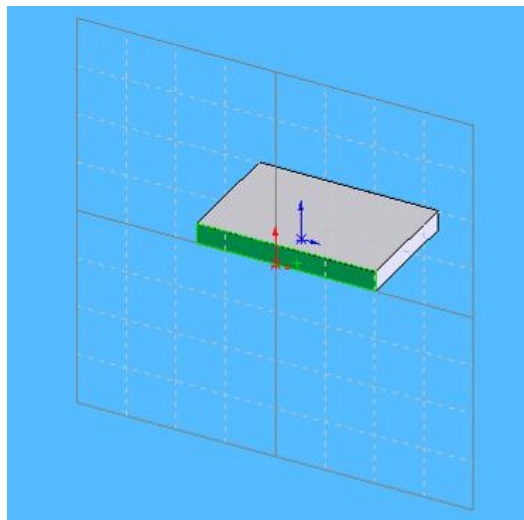


1.4.4. Наступний крок — видавлювання основи на величину 10 мм. Для цього в дереві проекту виберемо тільки що побудований ескіз **Sketch1**, у панелі перемикання виберемо **Features** (Властивості), і в панелі інструментів виберемо видавлювання — **Extruded Boss/Base** (видавлена бобишка), після чого вкажемо розмір видавлювання — 10мм, і натиснемо OK :

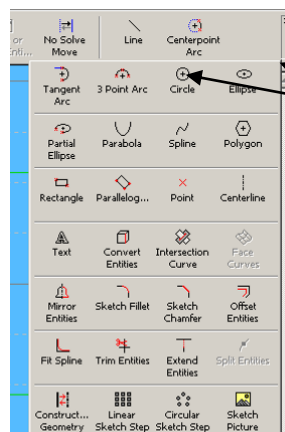


Зверніть увагу, що в дереві проєкту операція видавлювання поглинула ескіз **Scetch1**.

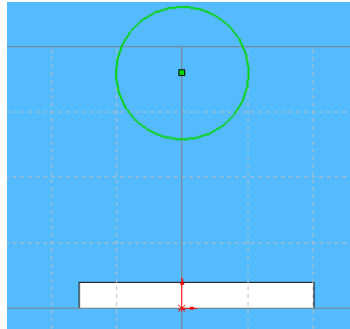
1.4.5. Створимо кільце-бобишку внутрішнім діаметром 24 мм і зовнішнім 50 мм віддалене від нижньої частини основи на 100 мм. Для цього виділимо мишею найближчий торець підстави (він підсвітиться іншим кольором), і створимо ескіз у площині цього торця (у панелі перемикавання натиснути кнопку **Sketch (Ескіз)** і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку):



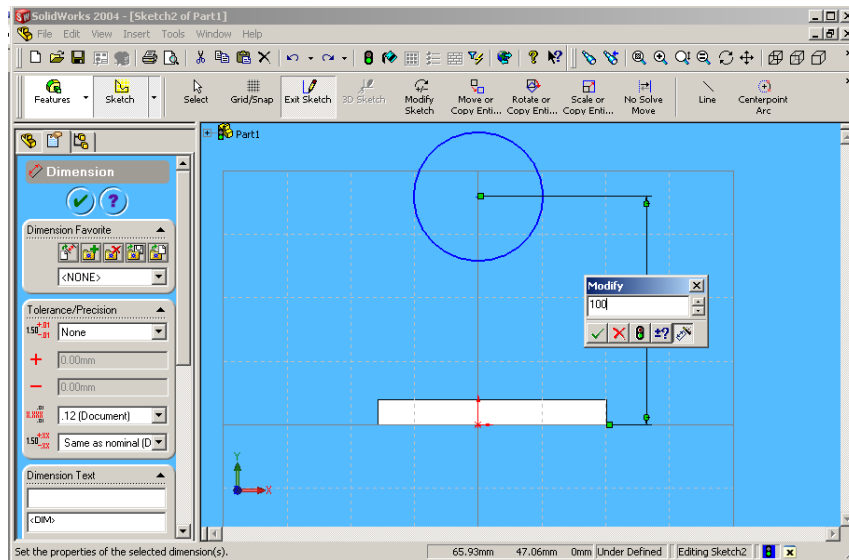
Створимо окружність діаметром 50 мм на деякій відстані від основи. Попередньо встановимо орієнтацію виду перпендикулярно до площини ескізу — **Головне Меню/View/Modify/Orientation**, або пробіл, **Normal To...**, після чого натиснемо кнопку переміщення виду  й установимо мишею зручне для промальовування окружності положення. Для створення окружності в інструментальній панелі ескізу (попередньо розширивши її значком >>) виберемо побудову окружності **Circle**:



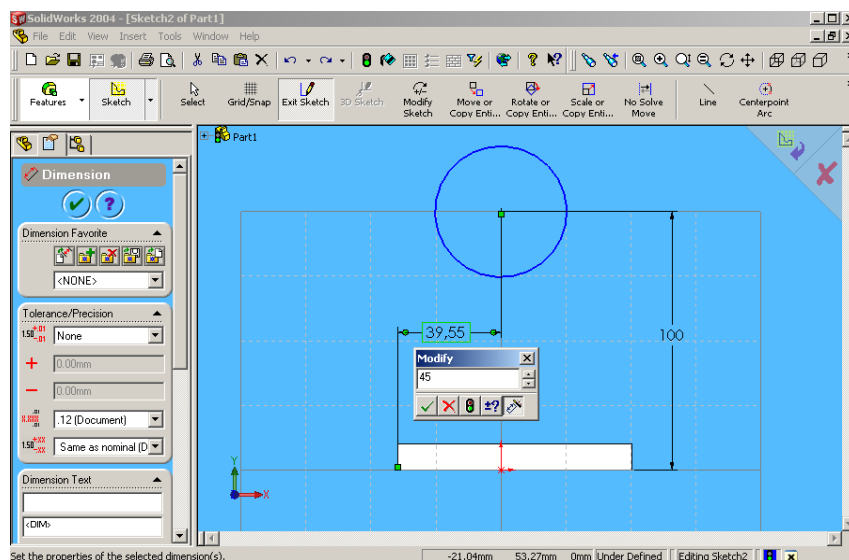
За допомогою покажчика, що з'явився, створимо попередню окружність із довільними розмірами, натиснемо ОК і потім Esc для завершення побудов окружностей:



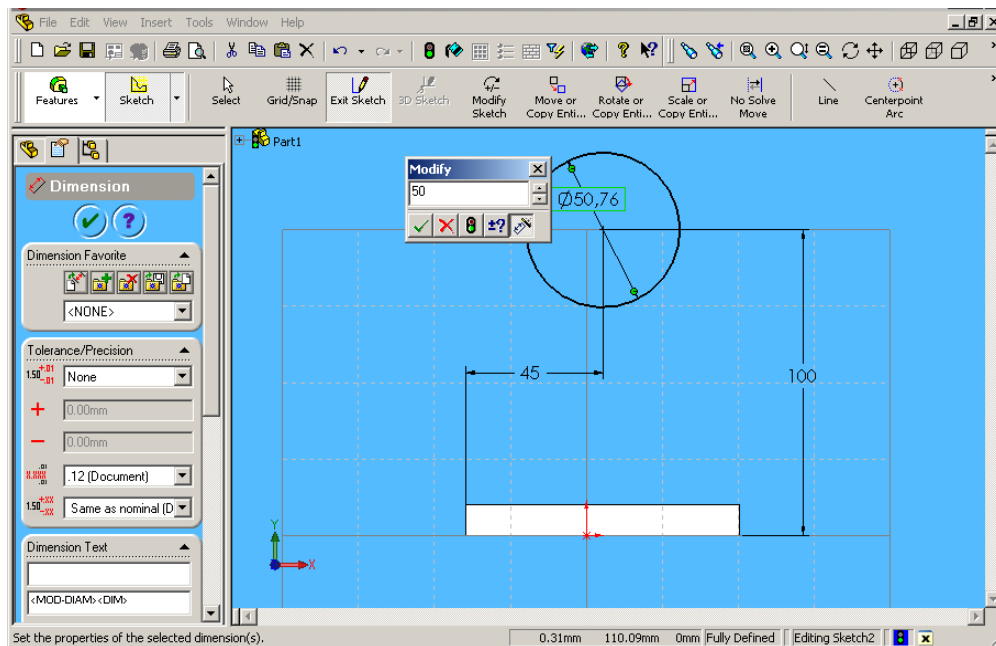
Вкажемо відстань від нижньої частини основи — **Головне меню / Tools / Dimensions / Vertical**, послідовно виберемо центр окружності й нижню частину підставки, вказуємо розмір рівний 100 мм, натиснемо ОК :



Встановимо горизонтальну позицію центру окружності (посередині основи) — **Головне меню / Tools / Dimensions / Horizontal**, послідовно виберемо центр окружності й бічну частину основи, вказуємо розмір рівний 45 мм, натиснемо ОК :

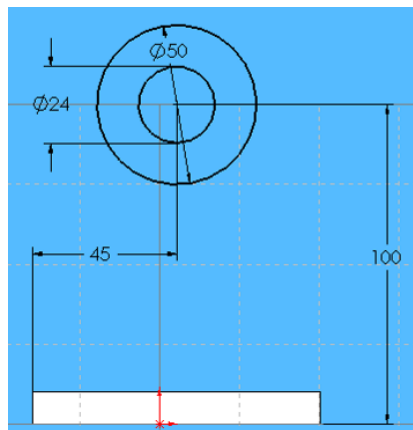


Вкажемо діаметр окружності — **Головне меню / Tools / Dimensions / Smart**, виберемо окружність, вказуємо розмір рівний 50 мм, натиснемо ОК .



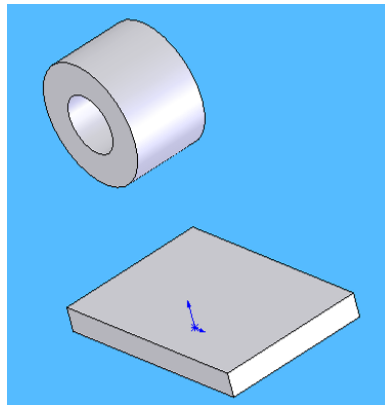
Ескіз підсвітиться чорним кольором — це значить він повністю визначений.

Із центру побудованої окружності аналогічним образом побудуємо ще одну окружність діаметром 24 мм:

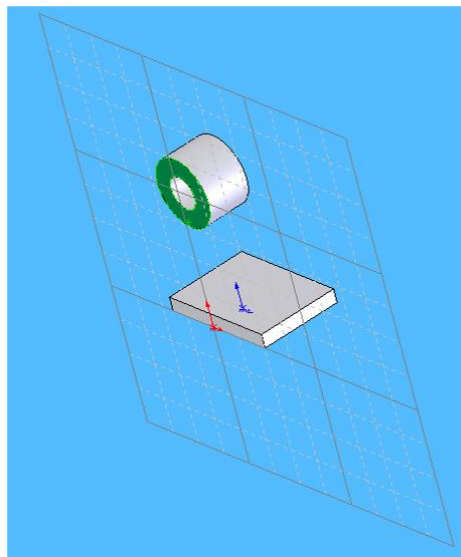


Після зазначених операцій завершимо редагування поточного ескізу , у дереві проєктування при цьому з'явиться ескіз із привласненим йому назвою **Scetch2**.

Зробимо видавлювання отриманого кільця на величину 32 мм. Для цього в дереві проєкту виберемо тільки що побудований ескіз **Scetch2**, у панелі перемикання виберемо **Features** (Властивості), і в панелі інструментів виберемо видавлювання — **Extruded Boss/Base** (видавлена бобишка), після чого вкажемо розмір видавлювання — 32 мм, реверсуємо напрямок видавлювання кнопкою  і натиснемо ОК .

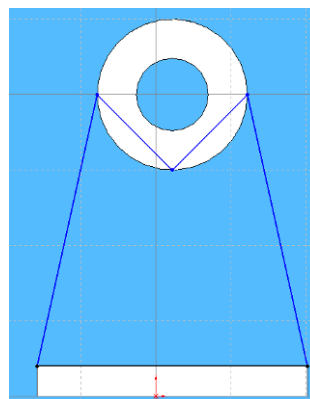


1.4.6. З'єднаємо основу й кільце стійкою. Для цього виділимо найближчий торець кільця й створимо в його площині новий ескіз (у панелі перемикавання нажати кнопку **Sketch** (Ескіз) і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку):



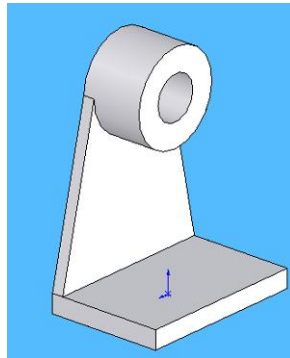
Попередньо встановимо орієнтацію виду перпендикулярно до площини ескізу — **Головне Меню/View/Modify/Orientation**, або пробіл, **Normal To...**

Виберемо в панелі інструментів побудову лінії **Line** і з'єднаємо крайні точки проекції як зазначено на малюнку (**Solidworks** буде автоматично виявляти прив'язки до крайніх точок основи й окружностей і підсвічувати при наведенні на них курсору):

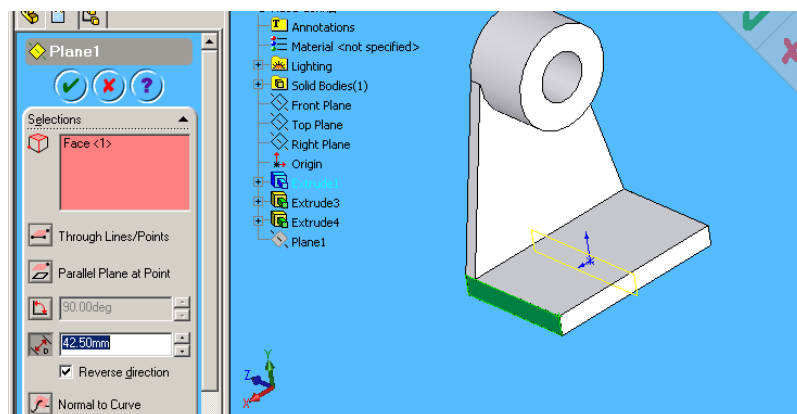


Після зазначених операцій завершимо редагування поточного ескізу , у дереві проєктування при цьому з'явиться ескіз із привласненим йому назвою **Scetch3**.

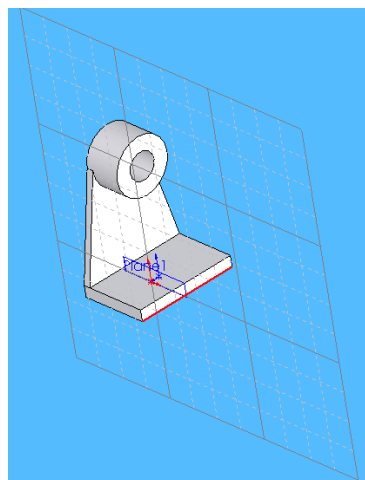
Зробимо видавлювання отриманого контуру на величину 6 мм. Для цього в дереві проєкту виберемо тільки що побудований ескіз **Sketch3**, у панелі перемикавання виберемо **Features** (Властивості), і в панелі інструментів виберемо видавлювання — **Extruded Boss/Base** (видавлена бобишка), після чого вкажемо розмір видавлювання — 6 мм, реверсуємо напрямок видавлювання кнопкою  і натиснемо ОК .



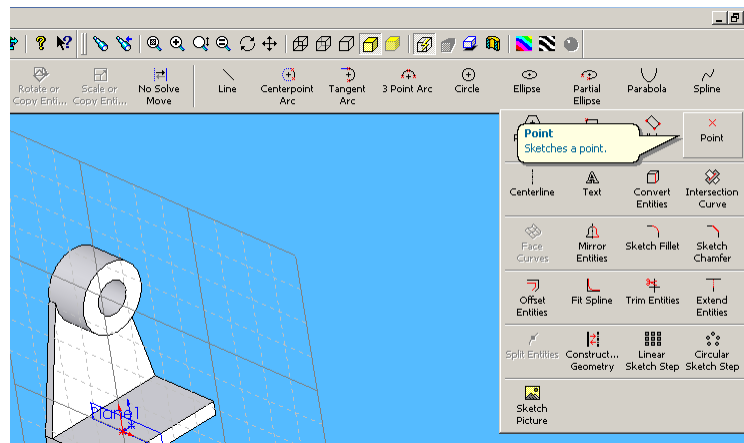
1.4.7. Побудуємо ребро жорсткості. Побудуємо допоміжну вертикальну площину, яка буде проходити через грань ребра жорсткості. Для цього виберемо менший з торців основи й використовуємо команду **Головне Меню/Insert/Reference Geometry/Plane**, де вкажемо відстань зсуву площини 42,5 мм (тобто $90/2 - 5/2$) і реверсування напрямку:



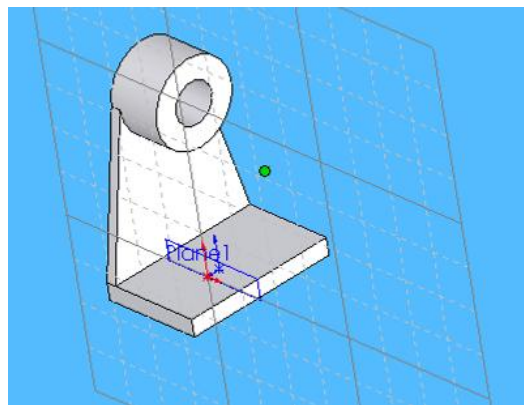
Після чого вибравши отриману площину в дереві проєкту створимо стандартним методом на ній ескіз (у панелі перемикавання натиснути кнопку **Sketch** (Ескіз) і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку):



Знайдемо точку перетинання площини ескізу й передньої крайки кільця. Для цього в панелі інструментів виберемо створення точки (**Point**):

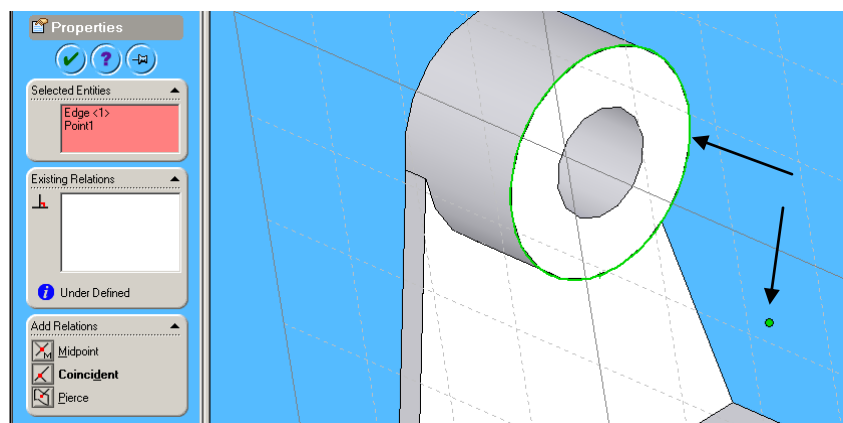


і поставимо точку в довільному місці ескізу:

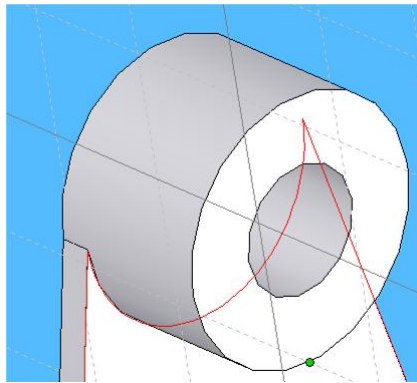


Натиснемо **Esc** для зняття задачі побудови послідовності точок.

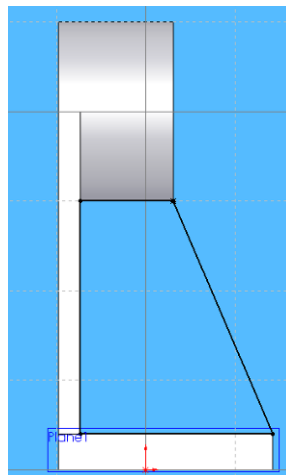
Встановимо прив'язку точки до передньої кромки кільця. Для цього виділимо точку, і втримуючи клавішу **Ctrl** виділимо кромку кільця як показано на рисунку нижче:



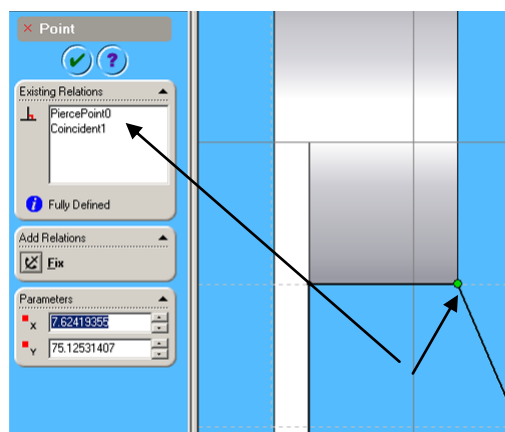
У меню **Add Relation** (додати взаємозв'язок) виберемо **Pierce** (перетинання), точка переміститься на кромку:



Установимо орієнтацію виду перпендикулярно до площини ескізу — **Головне Меню/View/Modify/Orientation**, або пробіл, **Normal To....** З'єднаємо отриману точку й крайні точки ескізу лінією як показано на рисунку, для лінії, що вказана стрілкою необхідно додати взаємозв'язок **Horizontal**:



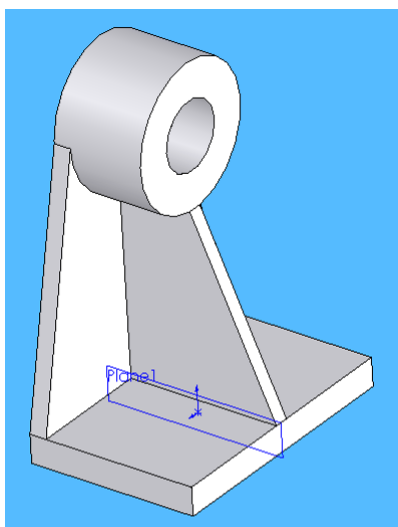
Перевірте наявність прив'язки верхньої лінії до побудованої нами точки — для цього виділіть верхню лінію, при цьому в списку, що відобразився, повинний бути зазначений взаємозв'язок вигляду:



Після зазначених операцій завершимо редагування поточного ескізу , у дереві проєктування при цьому з'явиться ескіз із привласненим йому назвою **Scetch4**.

Зробимо видавлювання отриманого контуру на величину 5 мм. Для цього в дереві проєкту виберемо тільки що побудований ескіз **Scetch4**, у панелі перемикання виберемо **Features** (Властивості), і в панелі інструментів виберемо видавлювання —

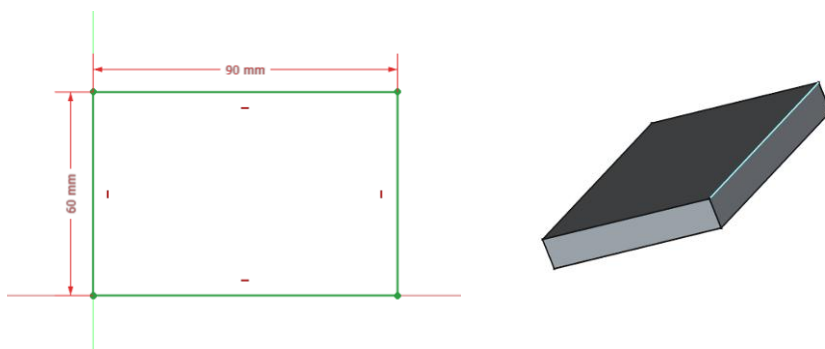
Extruded Boss/Base (видавлена бобишка), після чого вкажемо розмір видавлювання — 5 мм, реверсуємо напрямок видавлювання кнопкою  і натиснемо ОК .



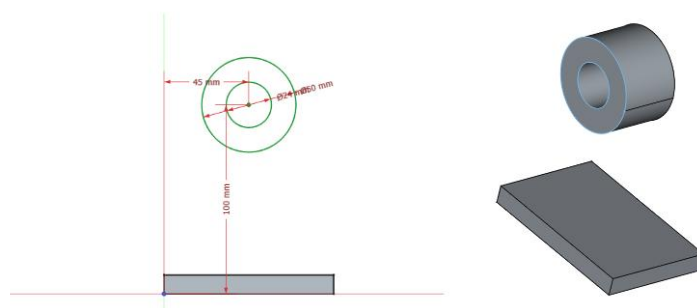
Твердотільна модель кронштейна побудована. Збережіть деталь.

1.5. Виконання завдання в системі FreeCAD

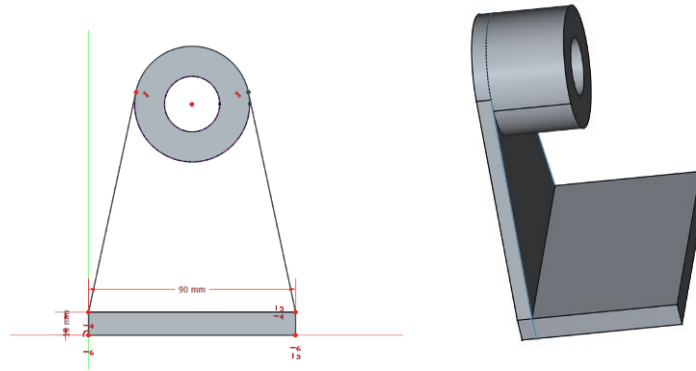
Послідовність виконання мало відрізняється від виконання в системі SolidWorks. Спочатку виконується побудування основи:



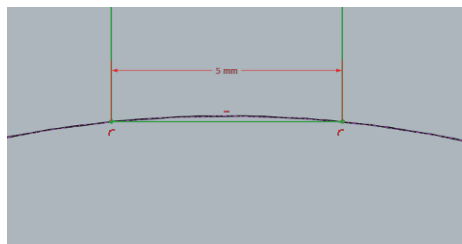
Після цього створюється нове тіло, що формує кільце-бобишку:



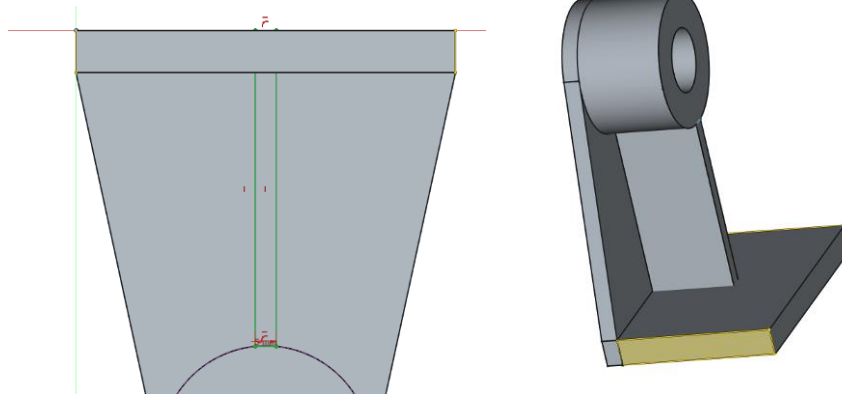
Далі, знаходячись в тому ж тілі створюється ескіз на торцевій поверхні кільця, та формується кронштейн



Побудування ребра жорсткості проводиться дещо інакше, ніж в SolidWorks. В першу чергу в дереві поточного тіла створюємо посилання на попереднє тіло (основу) командою Binded. Створюємо ескіз на передньому торці кільця, та проводимо відрізок довжиною 5 мм, що стягує коло (вказуємо додатково горизонтальність як обмеження):

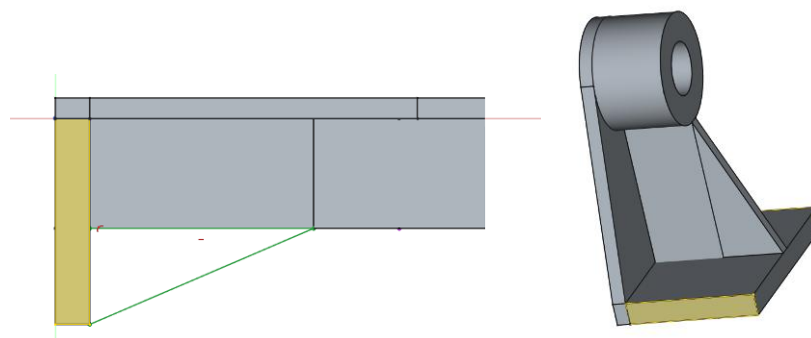


Після цього проводимо відрізки до основи та створюємо замкнутий прямокутник, та видавлюємо до наступної поверхні:

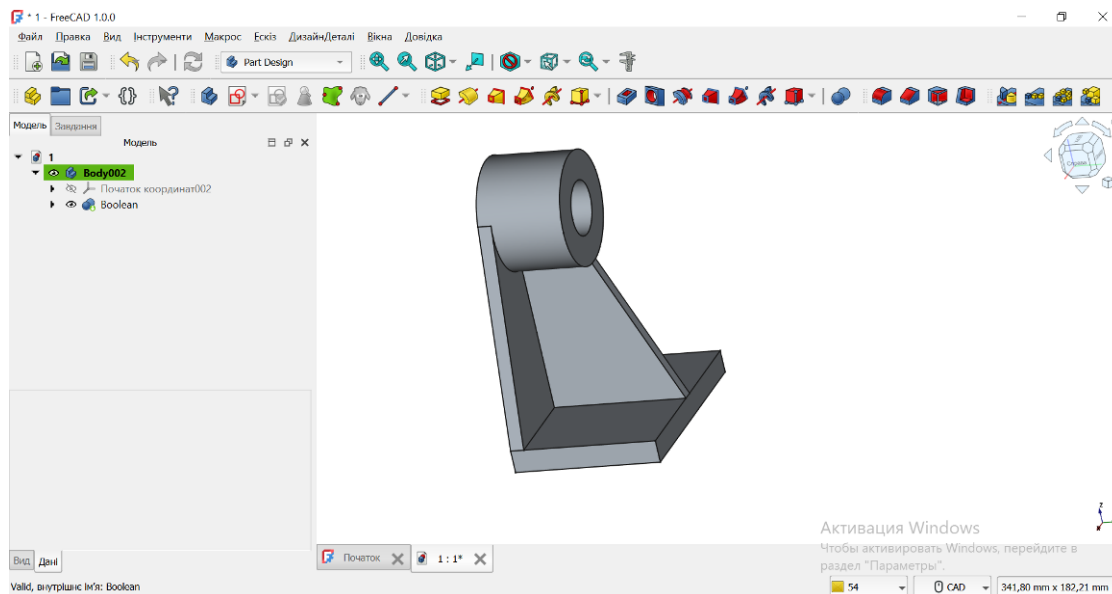


Треба звернути увагу, що грані та вершини з іншого тіла додаються за допомогою команди створення зовнішньої геометрії (SketcherExternal) , при цьому саме тіло в дереві побудування повинно бути погашено.

Після цього добудовується косинка:



Залишається тільки об'єднати тіла в одне ціле за допомогою команди об'єднання PartDesign Boolean 



Твердотільна модель кронштейна побудована. Збережіть деталь.

Контрольні питання.

1. Що таке твердотільне моделювання і чим воно відрізняється від поверхневого та каркасного моделювання?
2. Які основні операції використовуються для створення базових об'ємних тіл у твердотільному моделюванні?
3. Яка роль ескізів у побудові 3D-моделей та як забезпечується їх повна визначеність?
4. Які типи геометричних обмежень (прив'язок) застосовуються в ескізному моделюванні і для чого вони потрібні?
5. Опишіть основні етапи створення тривимірної моделі деталі в CAD-системі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Твердотільні моделі в CAD-системах. Обертове замітання, фаски та заокруглення

2.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок твердотільного моделювання й імпорту - експорту між САПР програмами.

Задача роботи — формування твердотільної моделі, використовуючи принципи ескізного моделювання, операцій замітання й накладення зв'язків на елементи моделі.

2.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.2.1. Сучасні інтегровані CAD / CAE- системи на прикладі Solidworks.

Останнім часом спостерігається помітна тенденція до об'єднання інструментів геометричного моделювання та розрахункових систем у єдині інтегровані платформи. Однією з перших компаній, яка реалізувала цей підхід, стала **PTC (Parametric Technology Corporation)**, що включила до складу **Pro/Engineer** модулі для міцнісного аналізу на основі методу скінченних елементів, а також інструменти для кінематичних і динамічних розрахунків.

Компанія **Dassault Systèmes** також зробила значний внесок, реалізувавши у **Catia V4** модуль для аналізу на міцність, який за рівнем функціональності ще на початку 90-х років був порівнянний із можливостями універсальних систем скінченно-елементного аналізу. Водночас сторонні розробники стикалися з обмеженим доступом до API таких систем — для роботи з внутрішніми процедурами програмування було потрібно отримання ліцензій та офіційного дозволу від правовласника. Крім того, розвиток прикладного програмного забезпечення гальмувався високою вартістю як самих CAD-систем, так і обладнання, зокрема графічних станцій, що працювали на процесорах архітектури RISC.

На відміну від закритих систем, **SolidWorks** та **FreeCAD** від початку розробки мала відкритий API, що стало потужним стимулом для розробників. Вони змогли інтегрувати свої продукти або вдосконалити вже існуючі програми з простим інтерфейсом. Наявність зручного графічного середовища і доступу до геометричного ядра значно прискорила розробку комерційного програмного забезпечення. При цьому, до моменту комерційного запуску, розробники не були зобов'язані вступати в офіційні відносини із SolidWorks, окрім придбання ліцензії.

Тим часом, незалежні CAE-системи вичерпали свій потенціал зростання — більшість професійних інженерів-розраховувачів вже мали необхідне програмне забезпечення. Тому виробники почали орієнтуватися на інженерів-проектувальників, інтегруючи розрахункові можливості безпосередньо в CAD-системи через створення додаткових, часто спрощених або адаптованих, модулів.

Сьогодні більшість розрахункових програм мають версії, які працюють як додатки до SolidWorks або інших популярних CAD-систем із великою користувацькою базою. Наприклад, з версії **SolidWorks 2003** в системі наявні безкоштовні модулі **CosmosXpress** (для базового міцнісного аналізу) і **Фізична динаміка**, що дозволяє проводити просте динамічне моделювання збірок. З версії **2005 року** наявний модуль **MoldflowXpress**, який виконує початкову оцінку придатності лиття тонкостінних виробів із термопластичних матеріалів.

У подальшому розглянемо окремі можливості на прикладі системи SolidWorks, які забезпечують ефективну взаємодію з розрахунковими інструментами.

2.2.2. Твердотільне моделювання

SolidWorks із самого початку розроблялася як система параметричного твердотільного моделювання. Програма має повний набір необхідних інструментів, серед яких є особливо корисні для створення моделей, придатних для подальших інженерних розрахунків. Зокрема, мова йде про моделювання виробів із листового металу та зварних конструкцій, які дозволяють створювати моделі, максимально наближені до вимог CAE-систем.

Серед важливих можливостей SolidWorks — підтримка роботи з криволінійними формами: інструменти побудови сплайнів, генерація тіл із криволінійними поверхнями, забезпечення плавних переходів і стиків. Ці функції дозволяють із достатньою точністю створювати моделі для задач аерогідродинаміки або світлотехнічного аналізу. Водночас у завданнях міцнісного розрахунку вимоги до геометричної точності поверхонь дещо нижчі.

З випуском версії 2003 року в SolidWorks з'явилася підтримка *багатотільного моделювання*, що значно розширило функціональність при створенні складних об'єктів. Однак не всі розрахункові системи одразу отримали підтримку цієї технології. Наприклад, лише з версії 2005 багатотільні моделі стали оброблятися в CosmosMotion.

SolidWorks також підтримує *створення конфігурацій моделей*, що дозволяє легко перемикатися між різними варіантами виконання одного виробу. Вбудовані розрахункові модулі, зокрема **CosmosWorks**, у більшості випадків коректно працюють із конфігураціями, дозволяючи паралельно аналізувати декілька сценаріїв. Крім того, параметричний підхід до побудови геометрії дав змогу інтегрувати модуль *параметричної оптимізації*, а також *сценарії проектування* — інструменти для аналізу впливу зміни форми, граничних умов, матеріалів та інших факторів на поведінку конструкції.

Ще одним напрямком розвитку SolidWorks стало вдосконалення роботи з *властивостями матеріалів*. У програмі реалізована база даних, що містить не лише візуальні характеристики (колір, прозорість, текстура), але й фізико-механічні властивості, такі як щільність, модуль пружності, міцність тощо. Це забезпечує тісну інтеграцію між моделюванням, візуалізацією та інженерним аналізом.

2.2.3. Поверхневе й гібридне моделювання

У порівнянні з іншими CAD-системами аналогічного класу, **SolidWorks** вирізняється високорозвиненими інструментами для створення та редагування поверхонь, а також для комплексної обробки поверхневої та твердотільної геометрії. Особливо це важливо для завдань, де потрібно гнучке управління формою об'єктів або створення складних геометричних структур.

Поверхневі моделі активно застосовуються в **CosmosWorks** для побудови *оболонкових розрахункових сіток*, що значно спрощує аналіз тонкостінних елементів. SolidWorks також містить інструменти, які дозволяють автоматично виділяти серединну поверхню зі складної твердотільної геометрії — це корисно в тих випадках, коли більш доцільним є використання оболонкової моделі при проведенні інженерних розрахунків.

У межах однієї деталі в SolidWorks можуть одночасно існувати як тверді тіла, так і поверхневі елементи. Вбудовані інженерні модулі здатні коректно враховувати цю гібридну структуру. Щоправда, деякі з них, як-от CosmosWorks, підтримують у межах однієї розрахункової задачі лише один тип геометрії. Проте важливо підкреслити, що джерело геометрії не має значення: якщо, скажімо, поверхня була створена на основі твердого тіла — для модуля розрахунку це не є принциповим, оскільки він працює виключно з кінцевим геометричним представленням.

2.2.4. Робота в збірці

SolidWorks надає широкі можливості для створення та редагування збірок, і ця функціональність безпосередньо враховується в розрахункових модулях. Як і у випадку з деталями, CAD-система бере на себе головну роль у підготовці коректної геометрії та взаємодій між компонентами збірки. Зокрема, просторове розміщення елементів і параметри їхньої взаємодії у фізичній моделі мають бути точно визначені через систему *сполучень* (mates).

Більшість розрахункових додатків, окрім **CosmosMotion**, не працюють із семантикою сполучень — вони оперують виключно геометрією. CosmosMotion у цьому контексті є винятком: він підтримує аналіз механізмів, навіть якщо спочатку не задані явні зв'язки між деталями. Проте у такому випадку користувач змушений створювати ці зв'язки вручну в середовищі CosmosMotion, виконуючи операції, подібні до тих, що вже реалізовані в SolidWorks.

SolidWorks також дозволяє візуалізувати кінематику збірки без застосування зовнішніх засобів. Анімація механізмів може виконуватись як вручну (за допомогою миші), так і за допомогою вбудованого режиму Фізичної динаміки. Програма має інструменти перевірки інтерференції між деталями як у статичному, так і динамічному режимах, із можливістю виявлення моментів контакту. Тому перед проведенням розрахунків рекомендовано виконати перевірку збірки всередині SolidWorks — розрахункові системи зазвичай дуже чутливі до наявності геометричних конфліктів між елементами.

У нових версіях SolidWorks з'явилися інструменти автоматизованого перетворення деталі у збірку, що можуть працювати як шляхом розділення одного тіла, так і на основі багатотільного представлення. Такий підхід дозволяє створювати асоціативні розрахункові моделі, які зберігають зв'язок з оригінальною деталлю. Це особливо зручно для задач, де потрібна контактна взаємодія між деталями з різними матеріальними властивостями, або для теплового аналізу, в якому важливо враховувати різні теплофізичні параметри.

Хоча можна створювати розрахункові моделі й на основі окремих деталей, для деяких типів конструкцій, таких як зварені вузли, часто ефективніше спочатку створити модель у вигляді єдиної деталі, а вже потім перетворити її в збірку.

Актуальною залишається і тема моделювання великих збірок, які включають тисячі компонентів. Тут варто виокремити два аспекти:

1. *геометричне моделювання* — можливості SolidWorks постійно розширюються, і з належним апаратним забезпеченням більшість завдань моделювання складних збірок сьогодні вирішувані. Крім того, для підвищення продуктивності можна використовувати режим спрощеної збірки (Large Assembly Mode);

2. *розрахунки великих збірок*: SolidWorks дозволяє створювати спеціалізовані розрахункові конфігурації, у яких елементи, що не беруть участі в аналізі, можуть бути вимкнені (погашені), а інші — спрощені для зниження обчислювальної складності. Це істотно оптимізує процес розрахунку моделей із великою кількістю елементів.

2.2.5. Робота в режимі креслення

Певні технологічні програми, зокрема системи оптимізації розкрою матеріалів або генератори керуючих програм для ЧПК-обладнання, що застосовується при різанні листового металу, можуть використовувати як плоскі розгортки деталей, так і інженерні креслення як джерело вихідних даних.

Починаючи з версії **SolidWorks 2005**, у складі програмного забезпечення з'явився вбудований редактор **DWGEditor**, який дозволяє безпосередньо працювати з файлами у форматах **DXF** та **DWG**.

Варто зазначити, що SolidWorks підтримує створення повноцінної конструкторської документації відповідно до різних стандартів оформлення креслень.

2.2.6. Сучасні інтегровані CAD / CAE- системи на прикладі FreeCAD.

FreeCAD містить інструменти, подібні до **CATIA**, **Creo**, **SolidWorks**, **Solid Edge**, **NX**, **Inventor**, **Revit**, і тому також належить до категорії інформаційного моделювання будівель (BIM), механічного автоматизованого проєктування (MCAD), PLM, CAx та CAE. Він задуманий як параметричний моделювальний засіб на основі елементів з модульною програмною архітектурою, що дозволяє легко надавати додаткові функції без зміни основної системи.

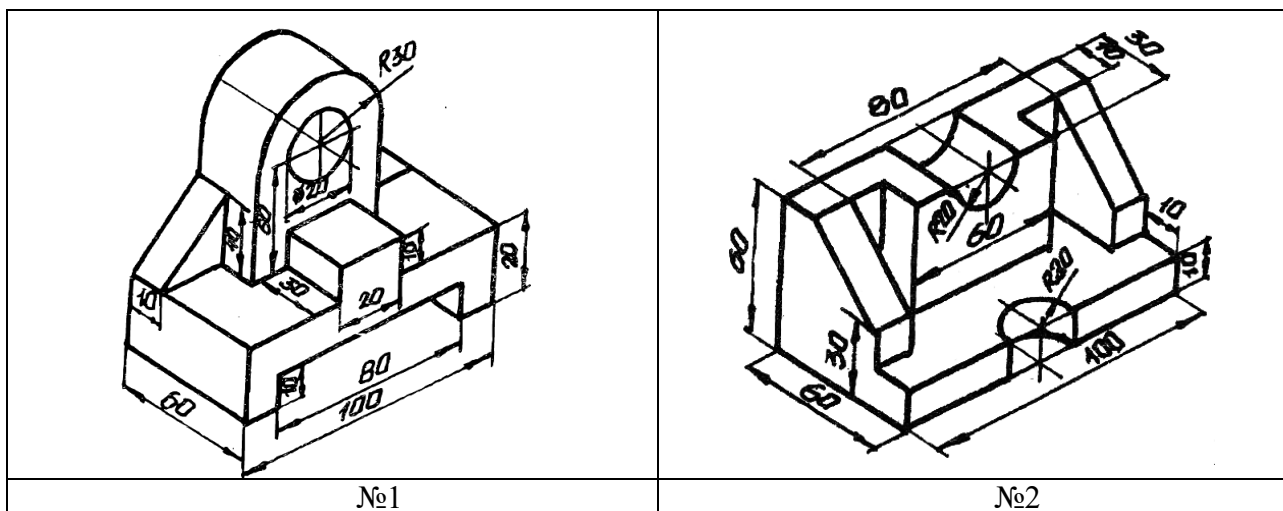
Як і багато сучасних 3D CAD-моделерів, FreeCAD має 2D-компонент для полегшення перетворення 3D в 2D креслення. У своєму поточному стані пряме 2D-креслення (як AutoCAD LT) не є фокусом цього програмного забезпечення, як і анімація чи маніпулювання 3D-моделями (як Blender, Maya або Cinema 4D). Однак модульна природа FreeCAD дозволяє користувачеві адаптувати свій робочий процес до таких середовищ за допомогою плагінів.

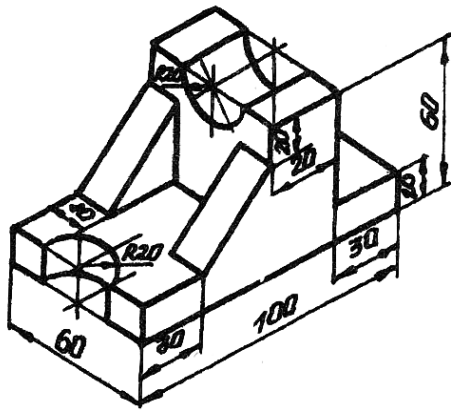
FreeCAD використовує бібліотеки з відкритим кодом з галузі обчислювальної науки; Серед них **Open CASCADE Technology** (ядро САПР), **Coin3D** (втілення Open Inventor), фреймворк **Qt GUI** та **Python**, популярна мова сценаріїв. Сам FreeCAD також може використовуватися як бібліотека іншими програмами.

Існують кроки щодо розширення FreeCAD у секторах архітектури, електротехніки та будівництва (AEC) та додавання функціональності інформаційного моделювання будівель (BIM) за допомогою модуля Arch.

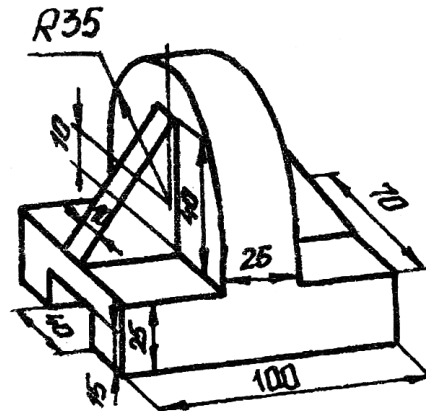
2.3. ЗАВДАННЯ

Відповідно до номера варіанта побудувати твердотільну модель деталі, зазначеної на рисунку нижче.

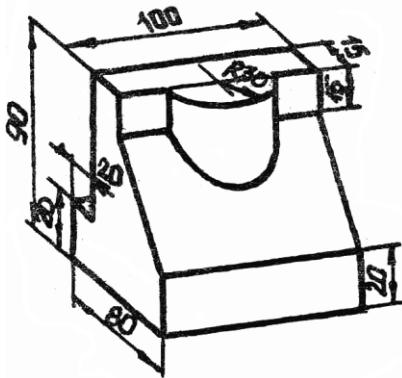




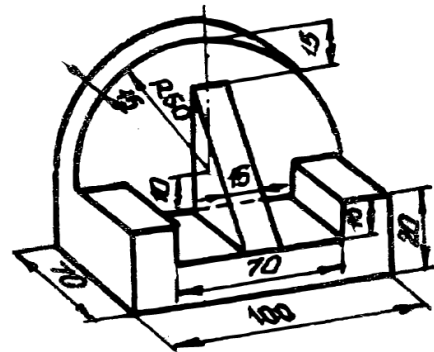
№3



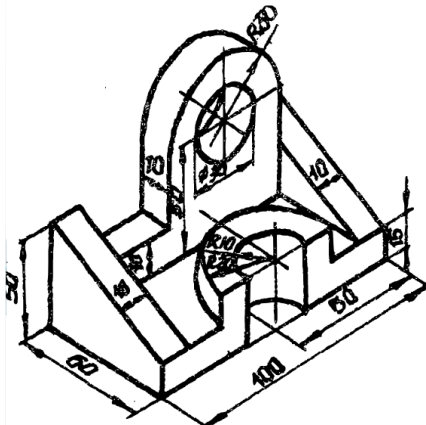
№4



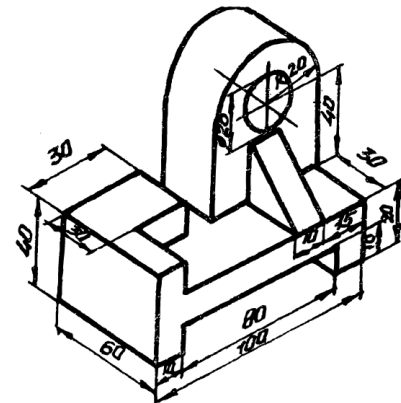
№5



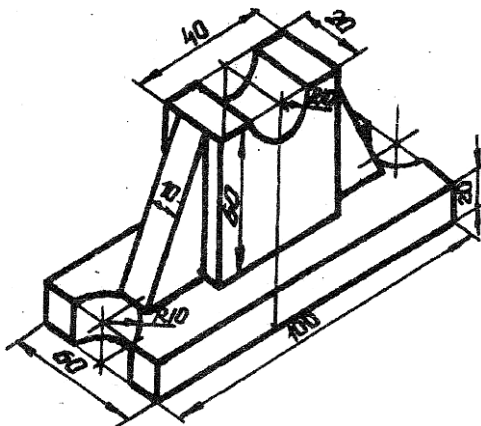
№6



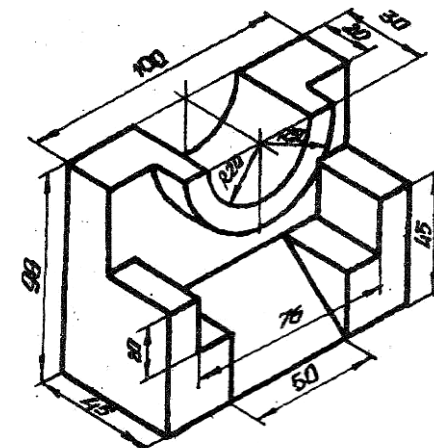
№7



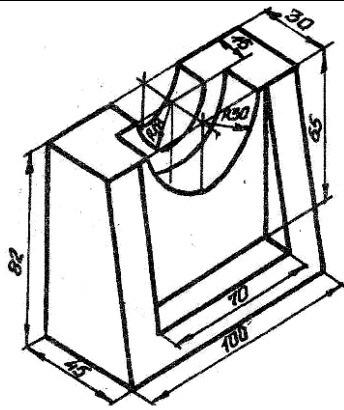
№8



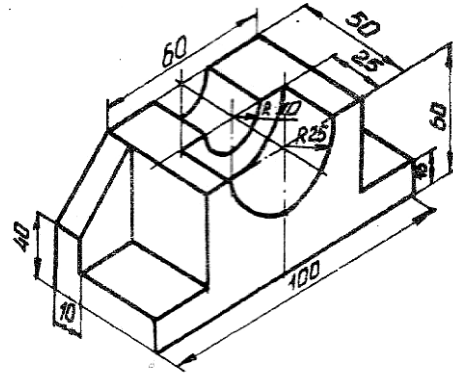
№9



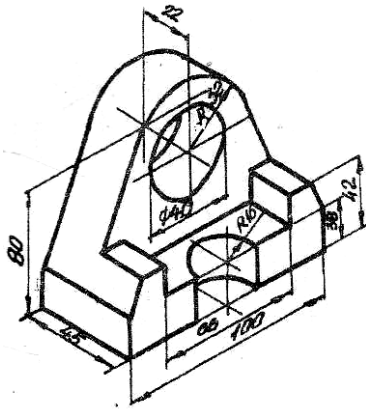
№10



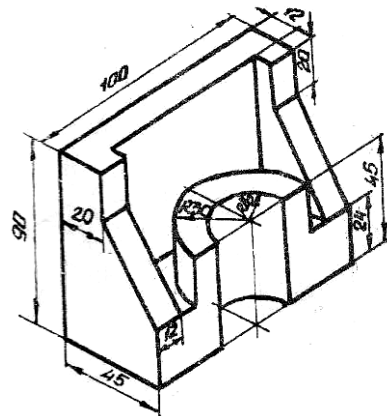
№11



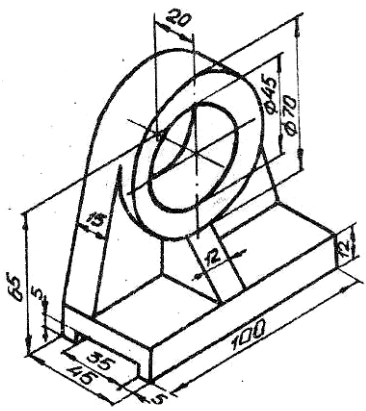
№12



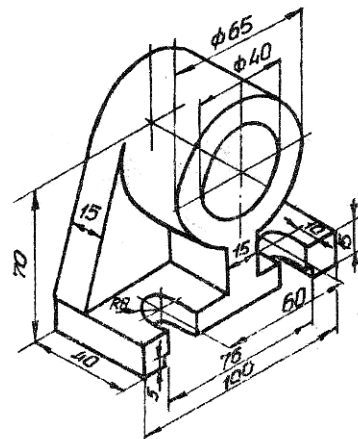
№13



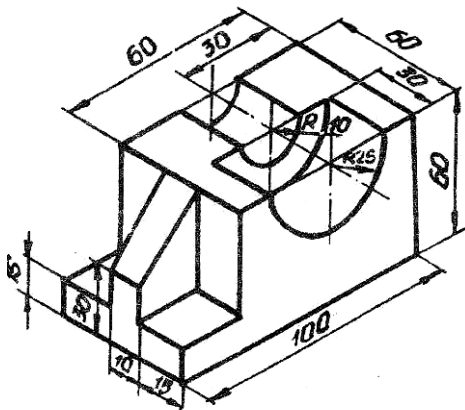
№14



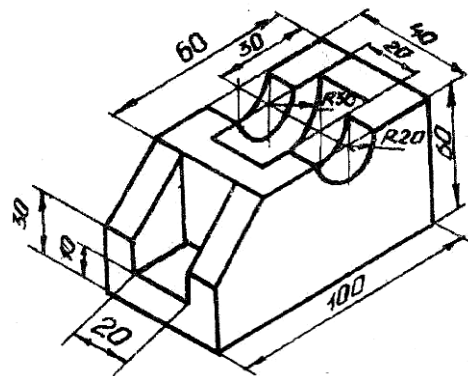
№15



№16



№17



№18

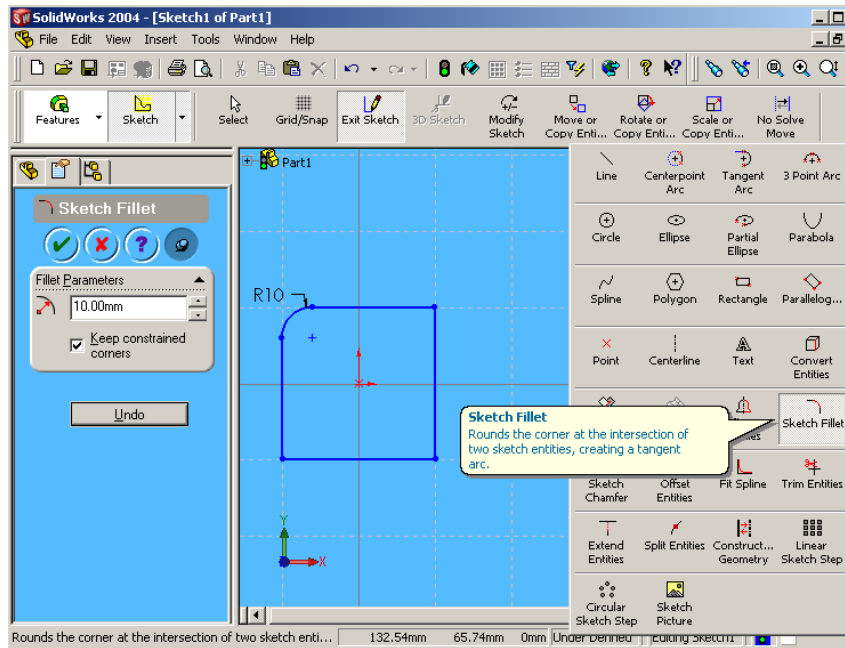
2.4. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ

В основному виконання роботи ґрунтується на вказівках і прикладі, що використовувався в попередній роботі. Додатково розглянемо деякі допоміжні операції, які можуть бути корисні при виконанні поточної роботи.

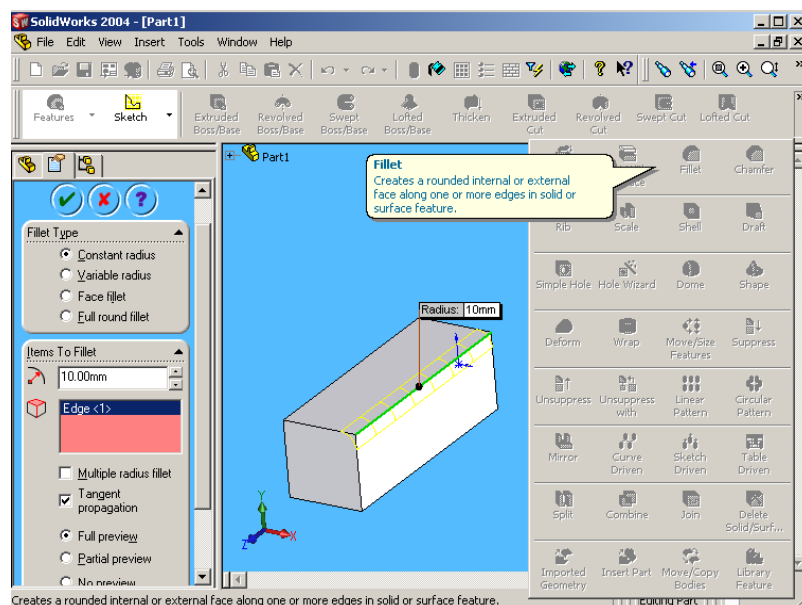
2.4.1. Розглянемо операцію заокруглення і створення фаски.

Закруглити можна кут між лініями в *режимі ескізу* і грань *тривимірної моделі*.

Для заокруглення кутів в ескізі необхідно вибрати в інструментальній панелі ескізу (попередньо розширивши її значком >>) команду **Sketch Fillet** і у вікні, що з'явилося, **Sketch Fillet** у рядку **Filled Parameters** указати радіус скруглення:

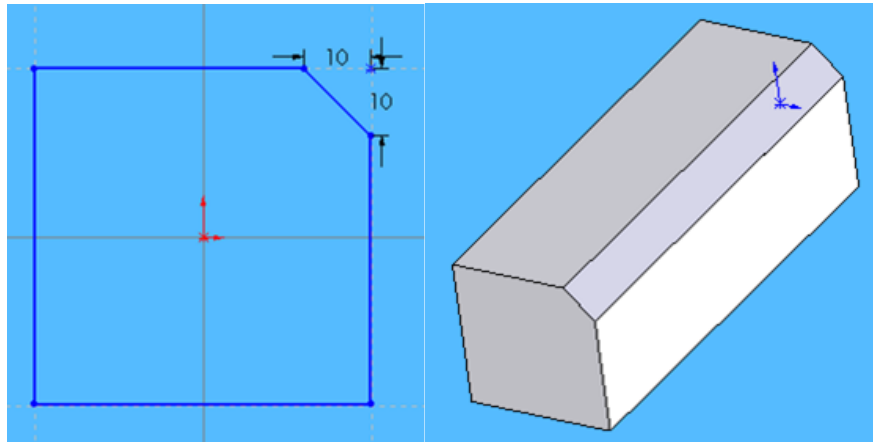


Для скруглення граней твердотільного об'єкта в панелі перемикавання виберемо **Features** (Властивості), і в панелі інструментів виберемо скруглення **Fillet**, і вкажемо відповідну грань:

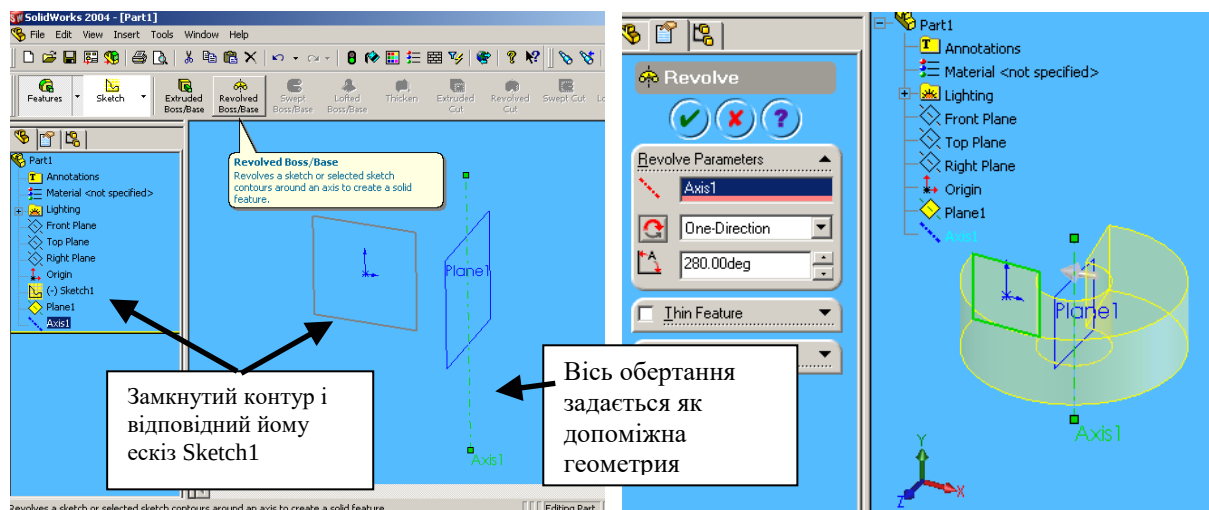


у вікні, що з'явилося, **Filled Type** у рядку **Items to Filled** необхідно вказати радіус заокруглення.

Створення фаски проводиться повністю аналогічно, команда ескізу — **Sketch Chamfer**, для твердотільної моделі — **Chamfer**.



2.4.2. Відзначимо операцію додавання об'єму за допомогою *замітання обертанням*. Для зазначеної операції необхідно використовувати команду **Revolved Boss/Base** і вибрати плоский замкнений контур і вісь обертання:



2.4.3. Необхідно згадати операцію видалення матеріалу. Вона повністю еквівалентна операції видавлювання (див. попередню лабораторну роботу) команда, що відповідає їй в панелі інструментів — **Extruded Cut** (для видалення матеріалу обертанням — **Revolved Cut**).

Контрольні питання.

1. У чому полягає суть операції обертального замітання і які елементи потрібні для її виконання?
2. Які параметри потрібно задати при створенні фаски в CAD-системі?
3. Яке призначення заокруглень у твердотільному моделюванні? Як вони впливають на експлуатаційні характеристики виробу?
4. Чим відрізняється внутрішнє заокруглення від зовнішнього?
5. Які можливі помилки виникають при побудові фасок і заокруглень у складних геометричних зонах?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Масиви елементів в CAD-системах

3.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок твердотілого моделювання з використанням масивів твердотілих та ескізних елементів

Задача роботи — формування твердотілої моделі, використовуючи принципи ескізного моделювання, операцій замітання й накладення зв'язків на елементи моделі.

3.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Одним з самих потужних інструментів проектування в Solidworks (і в усіх інших САПР) є масиви. З їхньою допомогою можна копіювати вихідні елементи побудови необхідне число раз у задані місця.

В **Solidworks** існують три основні типи масивів: *масиви в ескізах*, *масиви елементів* і *масиви компонентів*. Зрозуміло, що застосовуються вони на всіх рівнях проектування: *ескізах*, *елементах* і *збірках*. Розглянемо типи масивів один за одним.

Масиви в ескізах дозволяють досить просто «розмножувати» об'єкти ескізу: відрізки, дуги, окружності й т.п.

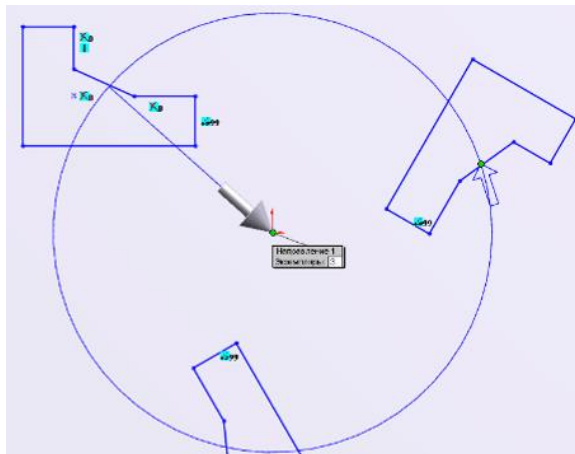


Рис. 3.1. Приклад масиву в ескізі.

Плюсами копіювання геометрії таким способом є простота, можливість подальшого керування параметрами між окремими об'єктами ескізу. Приміром, після створення масиву можна поставити будь-який розмір між двома екземплярами масиву, будь то габаритний розмір, або якийсь інший. До мінусів відноситься те, що при додаванні нових ліній або точок у вихідний екземпляр, вони не з'являться автоматично в його копіях, тому необхідно буде редагувати масив заново й додавати нові об'єкти вручну. Таким чином у масивів в ескізі низький рівень параметризації. Наприклад, щоб змінити кількість екземплярів в ескізі потрібно «входити» у сам ескіз. Щоб відредагувати подібний масив треба натиснути на одному з його об'єктів і у вікні «Існуючі взаємозв'язки» знайти рядок «Масив». По натисканню правої кнопки миші на цьому рядку можна викликати контекстне меню з командою редагування масиву.

Наступним типом масивів, що розглядаються є *масиви елементів*. Тобто копіюються вже елементи *Дерева Побудови*, такі як «Витягнута бобишка», «Витягнутий виріз» і т.п. В Solidworks застосовуються наступні різновиди масивів елементів:

- лінійні;
- кругові;
- масиви, керовані кривою;
- масиви, керовані ескізом;
- масиви, керовані таблицею.

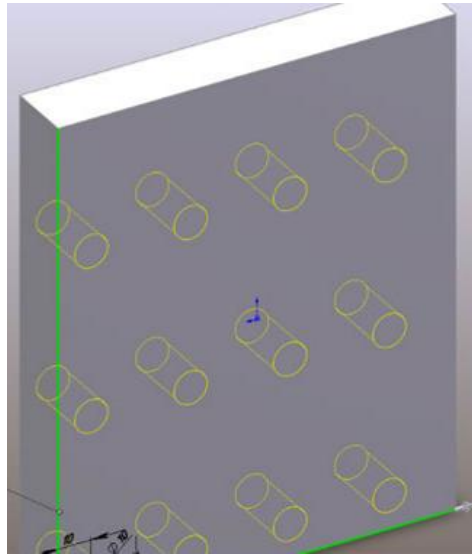


Рис. 3.2. Приклад лінійного масиву:

Для побудови вибирається один або два напрямки, у яких потрібно розмножити елемент, один або кілька елементів, які потрібно розмножити (у цьому випадку це «Витягнутий виріз» у вигляді отвору), проставляється кількість екземплярів у всіх необхідних напрямках, відстань між екземплярами.

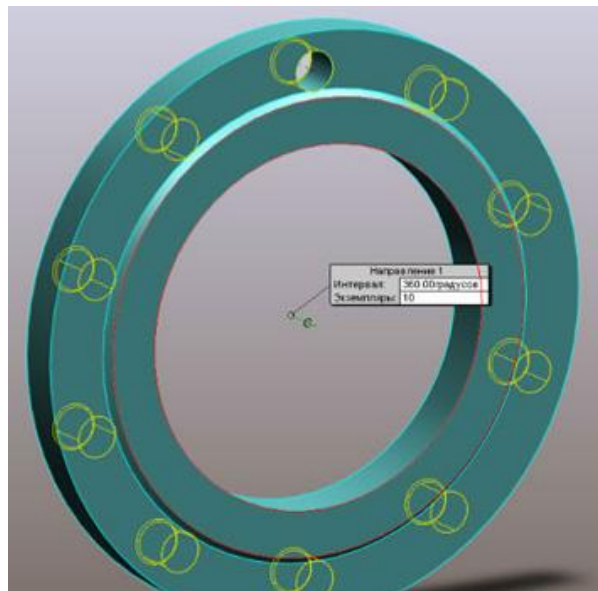


Рис. 3.3. Приклад кругового масиву.

У вікні параметрів вибираємо вісь (вона може бути як основною, так і допоміжною), вихідний елемент, установлюємо значення кута й кількість екземплярів. Інші параметри практично не відрізняються від параметрів лінійного масиву. Варто відзначити, що кут можна задавати як для всіх екземплярів відразу, установивши

прапорець «Рівний крок», так і як крок між екземплярами, забравши прапорець «Рівний крок».

При побудові масиву, керованого кривою необхідно створити вихідний екземпляр, а також криву. У якості кривої може використовуватися лінія ескізу (наприклад, сплайн), попередньо побудована крива або границя деталі.

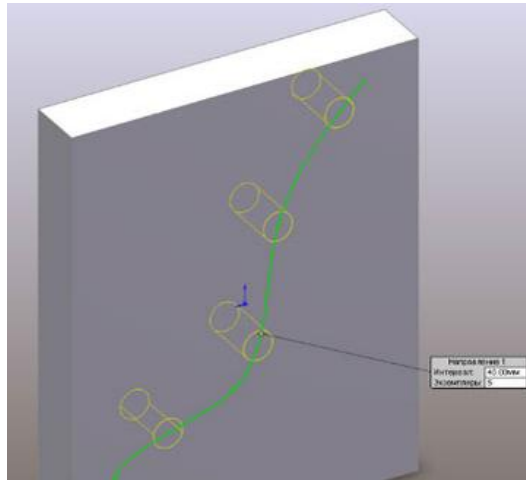


Рис. 3.5. Приклад побудови масиву, керованого кривою.

Одним із самих зручних елементів побудови в Solidworks є масив, керований ескізом: в ескізі вказуються точки, де повинні розташовуватися екземпляри масиву й застосовуємо цей масив. Приклад використання такого масиву:

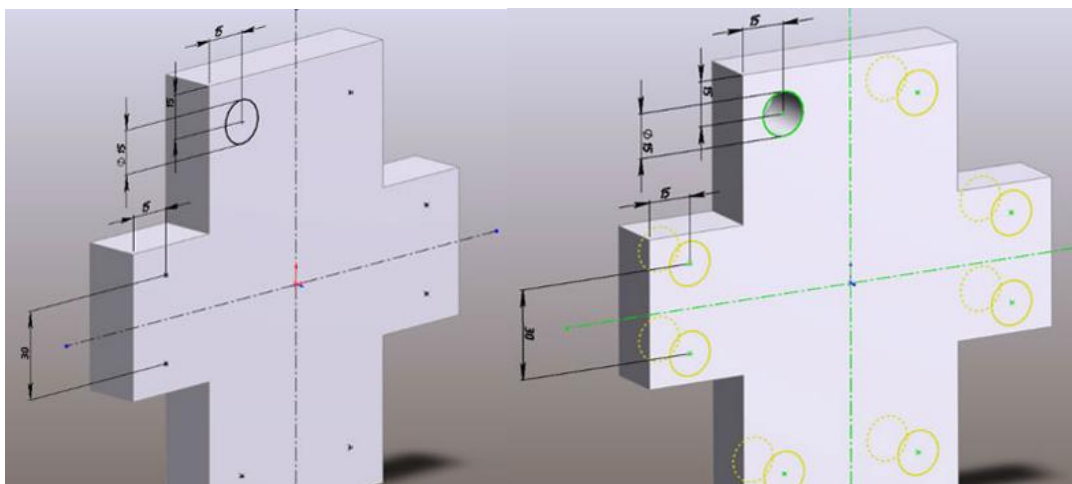
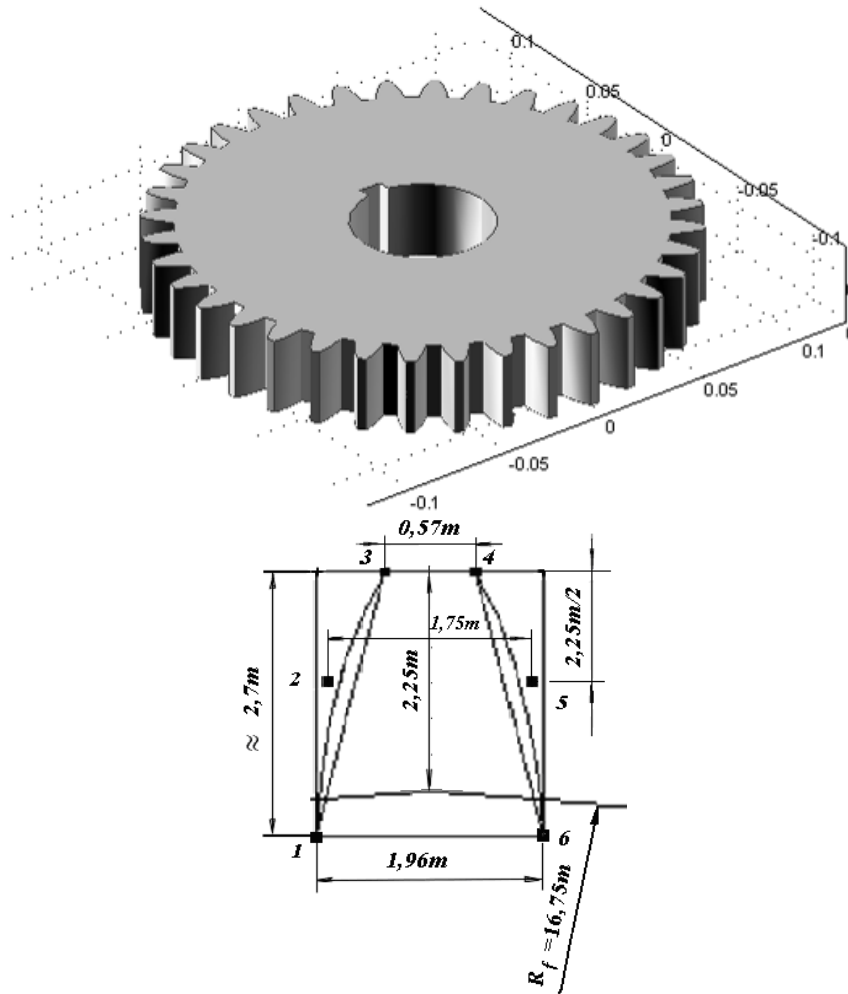


Рис. 3.6. масив, керований ескізом.

3.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступної системи твердотільного моделювання створити та розбити на скінченні елементи твердотільную модель зубчатого колеса:



Модуль зачеплення m задається.

3.4. ХІД РОБОТИ

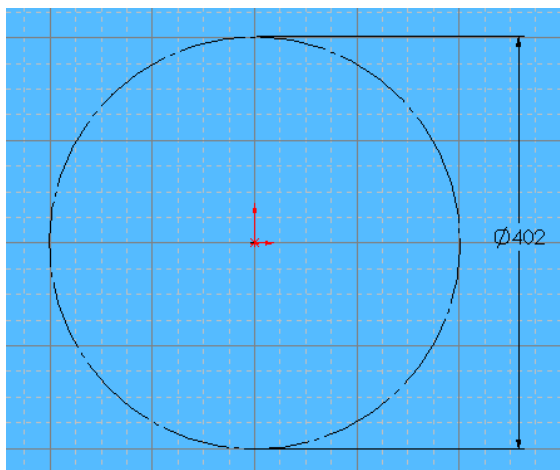
- 3.4.1. Створити новий файл з назвою роботи;
- 3.4.2. Почати роботу. Вказати тип задачі (наприклад, деталь);
- 3.4.3. За допомогою примітивів, що є в програмі, булевських операцій та інших функцій моделювання створити вказану твердотільну модель зубчатого колеса;
- 3.4.4. Зберегти результати та прикласти до звіту по лабораторній роботі.

3.5. Приклад виконання завдання в середовищі Solidworks

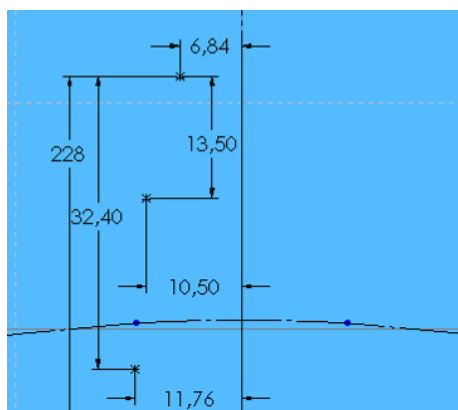
5.5.1. Запускаємо **Solidworks**, створюємо новий документ та переходимо до формування деталі **Part**.

5.5.2. Додаємо двовимірний шар — ескіз (нажати кнопку **Sketch** — Ескіз і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку, вказати площину ескізу — **Top Plane**)

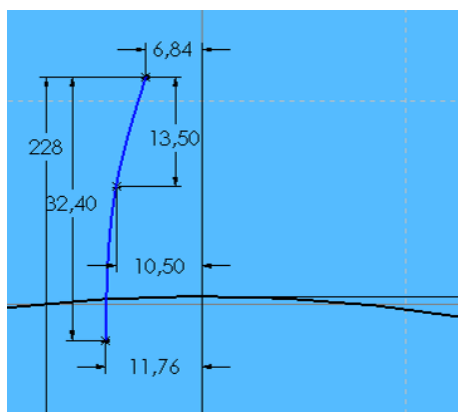
5.5.3. У робочому просторі ескізу будуємо зовнішню окружність заданого радіусу (вкажемо, що це допоміжна лінія — **for construction**) та уточнюємо її діаметр **Головне меню / Tools / Dimensions / Smart:**



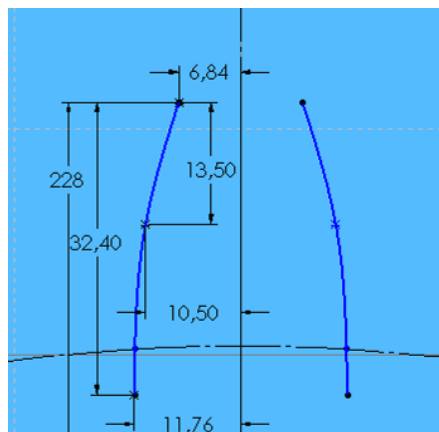
5.5.4. По заданій схемі знаходимо координати та будуємо точки 1-2-3-4-5-6, що окреслюють зуб. Зробимо спочатку ліву частину (1-2-3) з послідуочим дзеркальним відображенням:



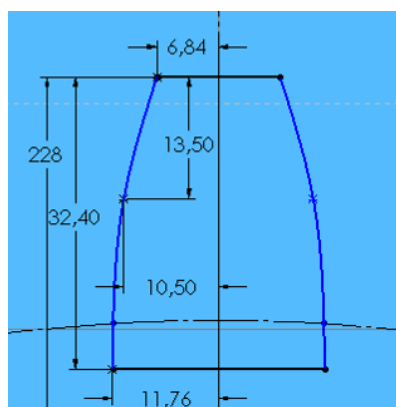
5.5.5. За допомогою команди **Spline** ескізу послідовно відзначаємо лівою клавішею миші точки 1-2-3. Завершується операція натисненням клавіші **Esc**:



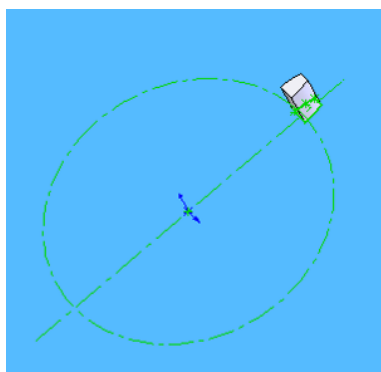
Проводимо віддзеркалення (для цього попередньо построїмо вертикальну осьову лінію, виділемо її та сплайн) — команда **Головне меню/Tools/Sketch Tools/Mirror** ескізу:



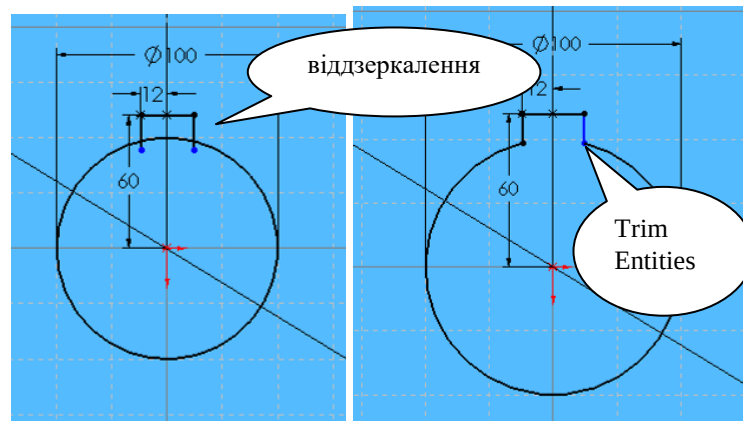
Замкнемо лініями точки 3-4 та 1-6:



3.5.6. Зробимо витягування цього зуба як твердотільної моделі (**Extruded Boss/Base**):

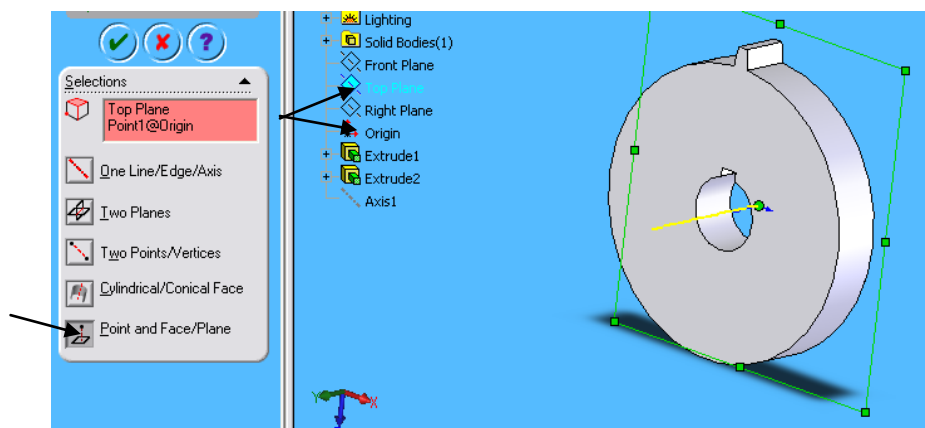


3.5.7. В площині Top Plane створимо ще один ескіз, в якому створимо основне коло з того ж центру, накреслимо отвір зі шпонковим пазом (шпонковий паз зручно зробити за аналогією до створення зуба — по точках з дзеркальним відображенням, та послідовним відлученням внутрішніх ліній за допомогою команди Trimming: **Головне меню/Tools/Sketch_Tools/Trim_Entities**)

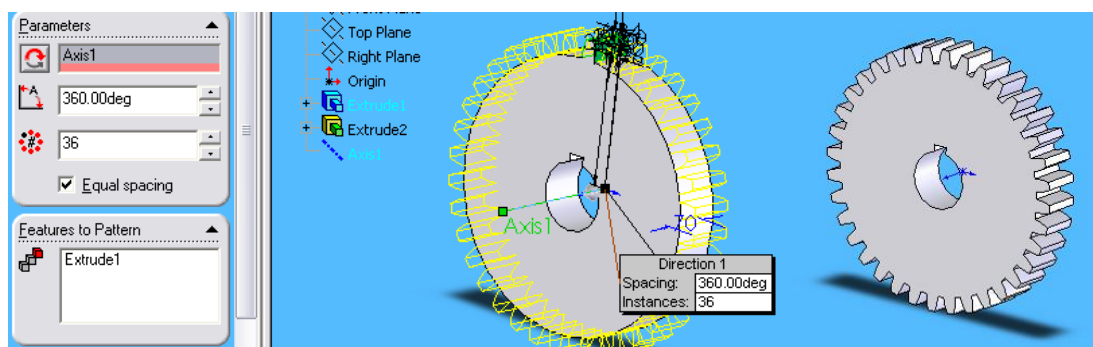


3.5.8. Зробимо витягування цього ескізу як твердотільної моделі (**Extruded Boss/Base**), контролюємо встановлення помітки для злиття результату — зуба з поточним ескізом:

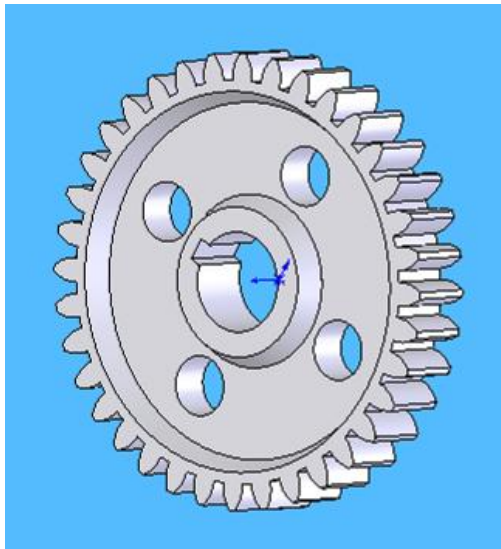
3.5.9. Побудуємо допоміжну геометрію — вісь, відносно якої буде створюватися масив зубців, — **Головне меню/Insert/Reference_Geometry/Axis**, для побудови вибираємо опцію **Point and Face / Plane**, та із дерева побудови вказуємо точку — початок координат і площину **Top Plane**:



3.5.10. За допомогою кругового масиву твердотільних елементів (**Головне меню/Insert/Pattern_Mirror/Circular Pattern**) встановимо 36 зубів по колу, вказуємо об'єкт **Extrude1** як елемент, що множить, та **Axis1** як вісь, відносно якої будуть проводитись копіювання, також додатково вказуємо 36 — число зубців, та ставимо помітку **Equal Spacing** для рівномірного копіювання:



Додаткові елементи деталі задаються. Наприклад, остаточний вигляд деталі може бути наступним:

**Контрольні питання.**

1. Що таке масив елементів у CAD-системах і які задачі він дозволяє вирішувати при моделюванні?
2. Які типи масивів підтримуються більшістю CAD-систем?
3. Чим круговий масив відрізняється від лінійного? Які параметри задаються для його побудови?
4. Як створити масив по траєкторії і в яких випадках це доцільно?
5. Наведіть приклади практичного застосування масивів у проєктуванні.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Багатотільні моделі та операції з ними в CAD-системах

4.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок твердотільного моделювання з використанням булевських операцій.

Задача роботи — формування багатотільної моделі, використовуючи принципи ескізного моделювання, операцій замітання та ін., з наступним використанням булевських операцій.

4.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

4.2.1. Функції моделювання

Функції твердотільного моделювання, які підтримуються більшістю сучасних CAD-систем, зазвичай поділяються на п'ять основних груп.

Перша група — це функції, що використовуються для створення базових об'ємних форм на основі стандартних геометричних заготовок (так званих *примітивів*). До цієї ж категорії відносять булевські операції (**Boolean operations**) — додавання, віднімання та перетин об'єму. Такі інструменти дозволяють швидко створити початкову форму, близьку до майбутньої геометрії деталі.

Друга група включає функції побудови об'ємних тіл шляхом переміщення плоских профілів. Зокрема, *замітання (sweeping)* — створення тіла шляхом переміщення профілю вздовж траєкторії, та *обертальне замітання (swinging)* — коли профіль обертається навколо осі. Також використовуються *геометричні обмеження* (наприклад, паралельність, дотичність) і числові параметри, які дозволяють системі автоматично створити точну форму. Тут під геометричними обмеженнями розуміються співвідношення між елементами рисунка (перпендикулярність відрізків, торкання дуги окружності відрізком тощо). У цьому випадку система побудує точну форму, що задовольняє обмеженням, самостійно. Зміна геометричних обмежень або розмірів дасть іншу плоску область та інше об'ємне тіло. Такий підхід називається параметричним моделюванням, оскільки зміна параметрів дозволяє одержати різні об'єкти. Параметрами можуть бути постійні, вхідні в геометричні обмеження, а також розміри. Зміна цих параметрів дає змогу швидко оновити модель. Такий підхід реалізує принцип *параметричного моделювання*. Крім того, *скінінг (skinning)* дозволяє створити тіло, натягнувши поверхню на задані поперечні перерізи, що значно спрощує побудову складних форм.

Третя група охоплює функції, які змінюють вже створену геометрію. Найбільш типовими є *округлення, плавне сполучення (rounding, blending)* та *підняття (lifting)*, що дозволяють деталізувати й оптимізувати форму.

Четверта група включає засоби прямого редагування геометричних складових об'ємного тіла — вершин, ребер і граней. Таке моделювання подібне до *поверхневого* і відоме як *моделювання границь (boundary modeling)*.

П'ята група охоплює *об'єктно-орієнтоване моделювання (feature-based modeling)*, за якого проєктувальник задає дії, типу: «зробити отвір такого-то розміру в такому-то місці» або «зробити фаску такого-то розміру в такому-то місці». Ці функції фіксують не лише результат, а й логіку побудови, що особливо важливо для подальшого *автоматизованого створення технологічного процесу*. Такі моделі містять більше, ніж просто геометрію — вони включають інформацію про способи виготовлення. Модель, створена іншими засобами, містить тільки елементарні геометричні відомості про вершини, ребра й грані.

4.2.2. Функції створення примітивів

Функції створення примітивів дають змогу користувачу вибирати та генерувати базові геометричні об'єкти, які закладені в систему моделювання її розробниками. Розміри таких елементів задаються вручну користувачем відповідно до потреб проекту. Найпоширеніші типи примітивів, що підтримуються більшістю CAD-систем твердотільного моделювання, показані на рисунках нижче. Позначені літерами розміри на цих рисунках можуть бути налаштовані користувачем довільно. Створення примітивів виконується за допомогою спеціальних процедур, що зберігаються в базі даних. При цьому значення параметрів (розмірів) передаються до відповідної процедури як аргументи, що дозволяє створювати примітиви з різними характеристиками на основі єдиного алгоритму.

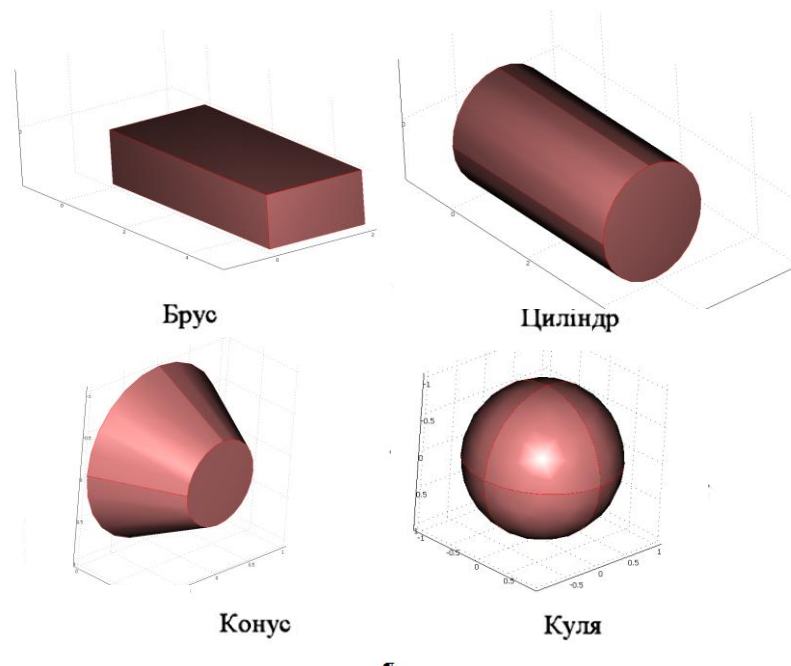


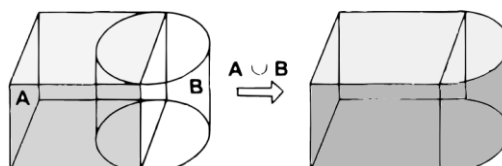
Рис. 4.1. Приклади примітивів.

4.2.3. Булевські операції

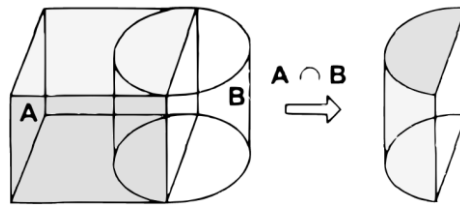
Через різноманітність можливих варіантів застосування систем геометричного моделювання заздалегідь описати всі можливі форми об'єктів практично неможливо. Значно ефективніше надати користувачу інструменти для комбінування базових примітивів. У твердотільному моделюванні як метод комбінування застосовуються булевські операції з теорії множин. Кожне примітивне об'ємне тіло розглядається як множина точок, до якої застосовуються булевські операції, у результаті чого утворюється нове об'ємне тіло, що складається з точок, отриманих у ході цих операцій.

Більшістю систем твердотільного моделювання підтримуються наступні булевські операції:

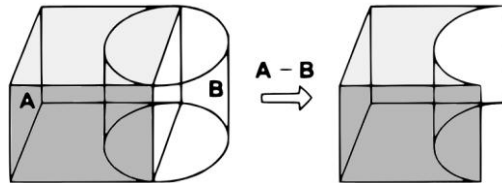
- об'єднання:



- перетинання:



- різниця:



Перед застосуванням булевських операцій необхідно визначити відносне положення й орієнтацію примітивів. Варто зауважити, що булевські операції можуть застосовуватися не лише до примітивів, хоча на рисунках для прикладу зображені саме вони.

Ще одна функція моделювання реалізується подібно до булевських операцій — це функція розрізання об'ємного тіла площиною. Після застосування такої операції виходить тіло, розділене на дві частини. Того ж результату можна досягти, застосувавши операцію вирахування між об'ємним тілом, яке потрібно розрізати, та кубом, одна з граней якого є січною площиною. Тому функція розрізання також може розглядатися як різновид булевських операцій.

При використанні булевських операцій слід бути уважним, щоб у результаті не отримати тіло, яке перестає бути об'ємним.

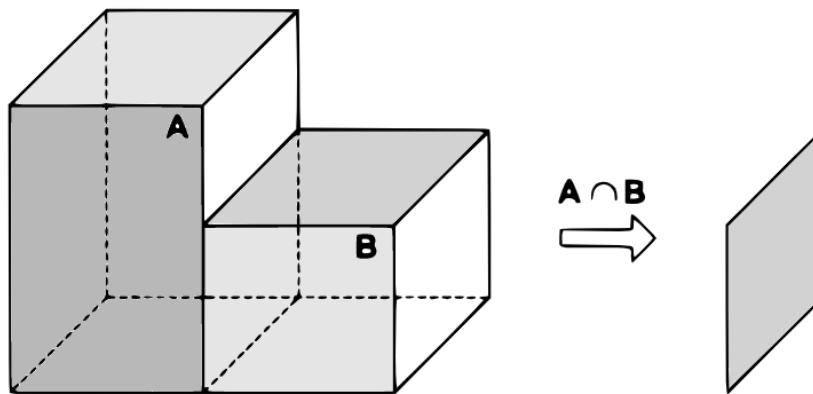


Рис. 4.2. Приклад створення виродженого об'єкту.

Деякі системи видають попередження про можливості одержання некоректного результату, інші можуть просто завершити роботу з повідомленням про помилку. Системи небагатообразного моделювання здатні обробляти й такі специфічні ситуації, оскільки вони працюють не тільки з об'ємними тілами, але й з поверхнями й каркасами.

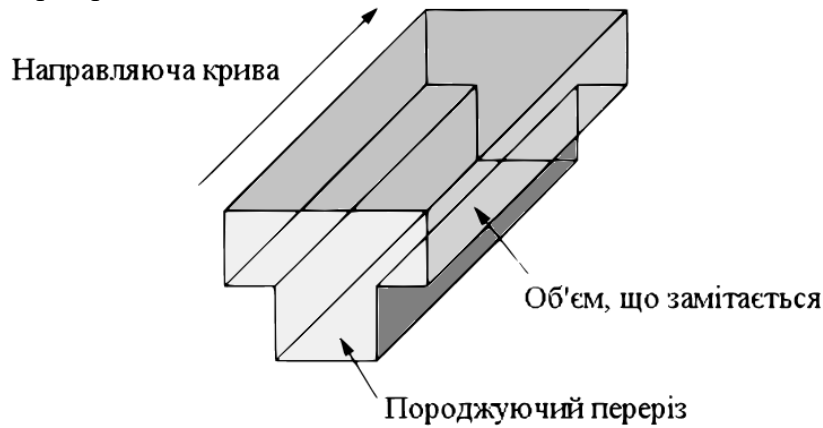
4.2.4. Замітання

Функція *замітання* (*sweeping*) формує об'ємне тіло трансляцією або обертанням замкнутої плоскої фігури. У першому випадку процес формування називається *замітанням при трансляції* (*translational sweeping*), у другому випадку — *побудовою*

фігури обертання (*swinging, rotational sweeping*). Якщо плоска фігура буде незамкнутою, у результаті замітання вийде не об'ємне тіло, а поверхня. Такий варіант замітання підтримується системами поверхневого моделювання.

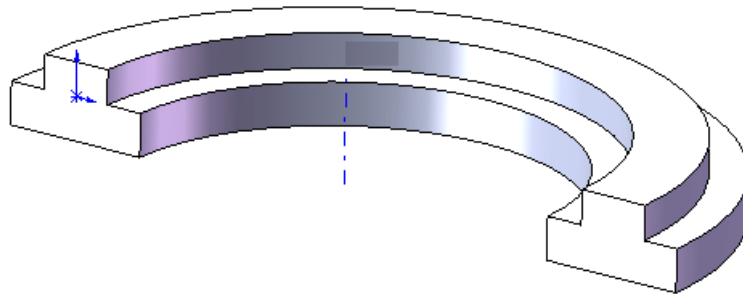
Як приклад представлено

- замітання при трансляції:



- замітання при обертанні:

Вісь обертання



4.2.5. Скінінг

Функція *скінінгу* (*skinning*) формує замкнутий об'єм, натягуючи поверхню на задані плоскі поперечні перерізи тіла.

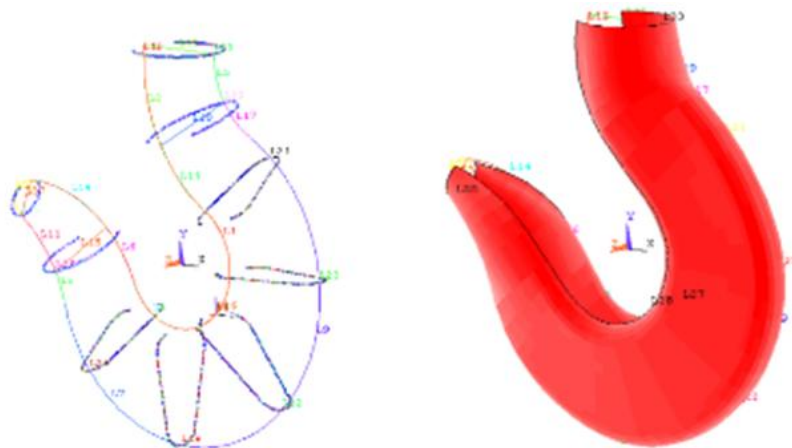


Рис. 4.3. Операція скінінгу.

Можна уявити собі, що на каркас фігури, утворений границями поперечних перерізів, натягається тканина або вініл. Якщо до натягнутої поверхні не додати кінцеві грані (два крайніх перетини), у результаті вийде поверхня, а не замкнутий об'єм. У такому варіанті функція скінінгу представлена в системах поверхневого моделювання.

4.2.6. Заокруглення або плавне сполучення

Заокруглення (*rounding*), або *плавне сполучення* (*blending*), використовується для модифікування існуючої моделі, що складається в заміні гострого ребра або вершини гладкою криволінійною поверхнею, вектори нормалі до якої продовжують вектори нормалі поверхонь, що сходилися у вихідного ребра або вершини.

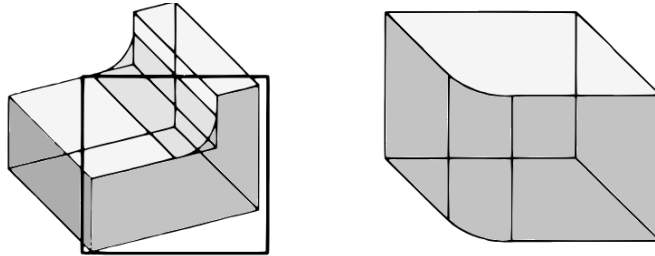


Рис. 4.4. Операція заокруглення.

Вектори нормалі до циліндричної поверхні продовжують векторами сусідніх плоских граней.

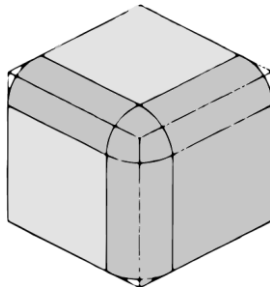


Рис. 4.5. Заміна гострої вершини сферичною поверхнею.

4.2.7. Підняття

Підняттям (*lifting*) називається переміщення всієї грані об'ємного тіла або її частини в заданому напрямку з одночасним подовженням тіла в цьому напрямку.

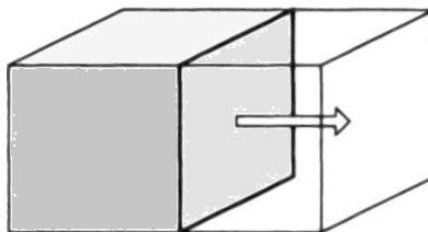


Рис. 4.6. Операція підняття.

При роботі з функцією підняття необхідно правильно вказувати напрямок і довжину підняття, щоб додана частина тіла не перетиналася з вихідною. Перетинання не спричинить проблем, якщо функція підняття реалізована таким чином, що при перетині відбувається об'єднання доданої частини з вихідним тілом. Проте спочатку функція підняття була розроблена для невеликих локальних змін, тому ситуація, показана нижче, призводить до утворення некоректного об'ємного тіла.

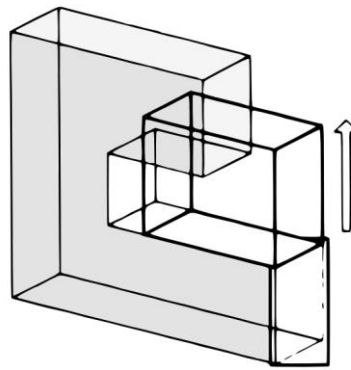


Рис. 4.7. Утворення некоректного об'ємного тіла.

4.2.8. Моделювання границь

Функції *моделювання границь* використовуються для додавання, видалення й зміни елементів об'ємного тіла — його вершин, ребер та граней. Отже, процедура, що використовує функції моделювання границь, буде виглядати точно так само, як у системах поверхневого моделювання. Інакше кажучи, спочатку створюються точки, потім ребра, що з'єднують ці точки, а нарешті граничні ребра формують поверхню. Однак у системах твердотільного моделювання, на відміну від поверхневого моделювання, необхідно визначити всі поверхні таким чином, щоб вони утворили замкнутий об'єм. Приклад створення клина за допомогою функцій моделювання границь наведено нижче.

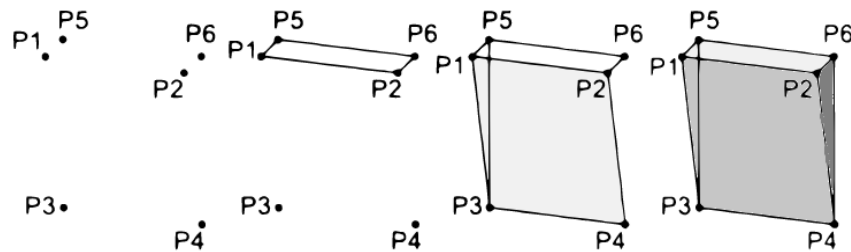


Рис. 4.7. Моделювання границь.

Процедура включає створення точок, граней і поверхонь. Створювати об'ємне тіло виключно за допомогою функцій моделювання границь дуже втомливо. Ці функції головним чином застосовуються для створення плоских фігур, які потім використовуються як перетини об'ємних тіл, утворених замітанням або скінінгом. Водночас функції моделювання границь зручно використовувати для зміни форми вже існуючого тіла.

4.3. ЗАВДАННЯ

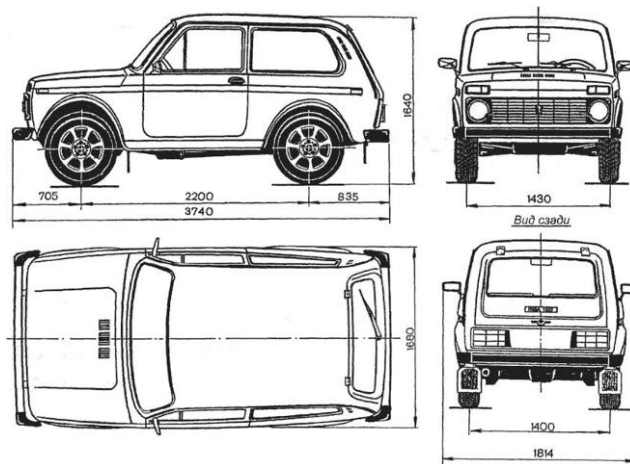
За допомогою будь-якої доступної системи твердотільного моделювання створити модель автомобіля для наступних розрахунків аеродинамічних показників в системах CFD.

Моделі для подібних розрахунків повинні бути достатньо спрощеними та не мати дрібних елементів. У зв'язку з наявністю вісі симетрії формується лише половина розрахункової області (все вказане необхідно для зниження вимог до потужності комп'ютерної техніки при подальших розрахунках). Достатньо дотримуватися лише габаритних розмірів з відповідними кутами нахилу поверхонь, кузовні елементи достатньо створювати або прямими або сплайнами з невеликою кількістю точок.

Після створення твердо тільної моделі вона повинна бути занурена в глобальний достатньо великий об'єм у формі паралелепіпеда, моделюючи оточуючий простір, з наступною булевською операцією вилучення об'єму автомобіля з об'єму оточуючого простору (моделюється тільки об'єм, що зайнятий оточуючим повітрям).

Для вибору моделі бажано мати основні габаритні показники для креслення та дані про аеродинамічні випробування, для наступного порівняння з розрахунковими величинами.

В якості приклада розглядається створення моделі автомобіля, габаритні розміри якого вказані на рисунку нижче.



4.4. ХІД РОБОТИ

4.4.1. Створити новий файл з назвою роботи;

4.4.2. Почати роботу. Вказати тип задачі (наприклад, деталь);

4.4.3. За допомогою примітивів, що є в програмі, булевських операцій та інших функцій моделювання створити вказану твердотільну модель автомобіля та оточуючого простору;

4.4.4. За допомогою булевської операції вирахування об'ємів створити простір, що зайнятий безпосередньо повітрям.

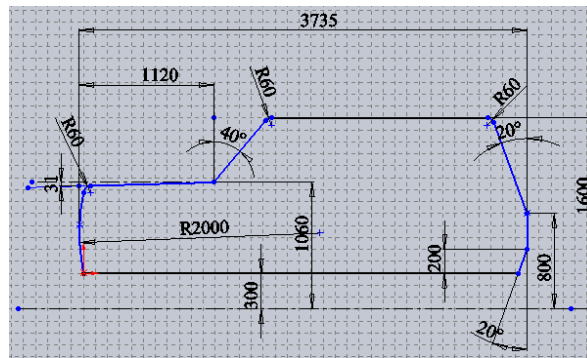
4.4.4. Зберегти результати та прикласти до звіту по лабораторній роботі.

4.5. Приклад виконання завдання в середовищі Solidworks

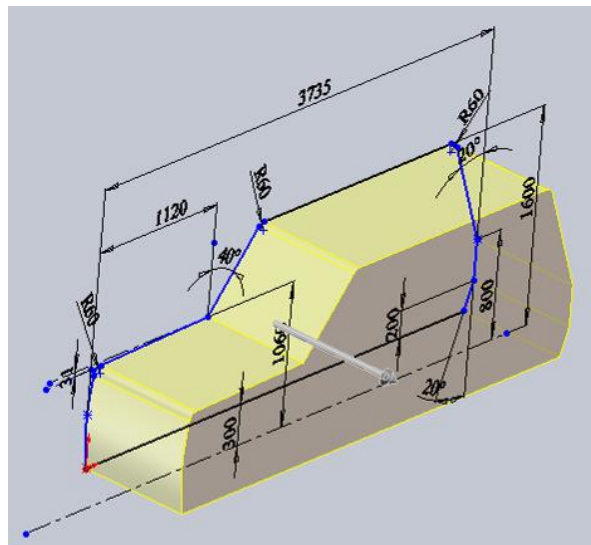
4.5.1. Запускаємо **Solidworks**, створюємо новий документ та переходимо до формування деталі **Part**.

4.5.2. Додаємо двовимірний шар — ескіз (нажати кнопку **Sketch** — **Ескіз** і в інструментальній панелі вибрати однойменну кнопку, вказати площину ескізу — **Top Plane**)

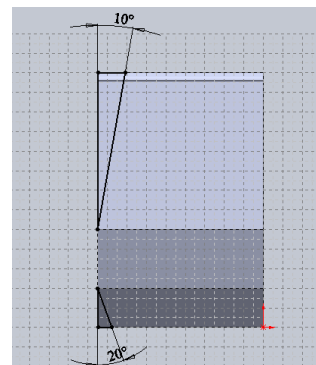
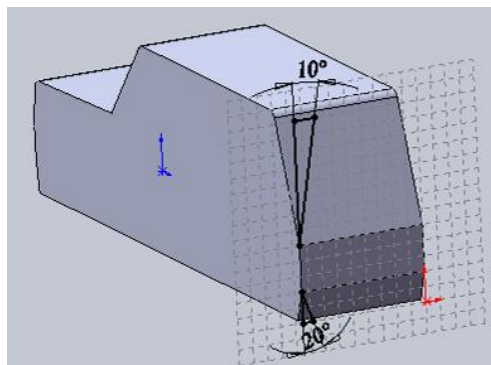
4.5.3. У робочому просторі ескізу будуємо вказане нижче побудування. Рекомендується почати з допоміжної лінії (осьова) відносно якої проводяться наступні побудування з використанням всіх раніше розглянутих функцій формування ескізу:



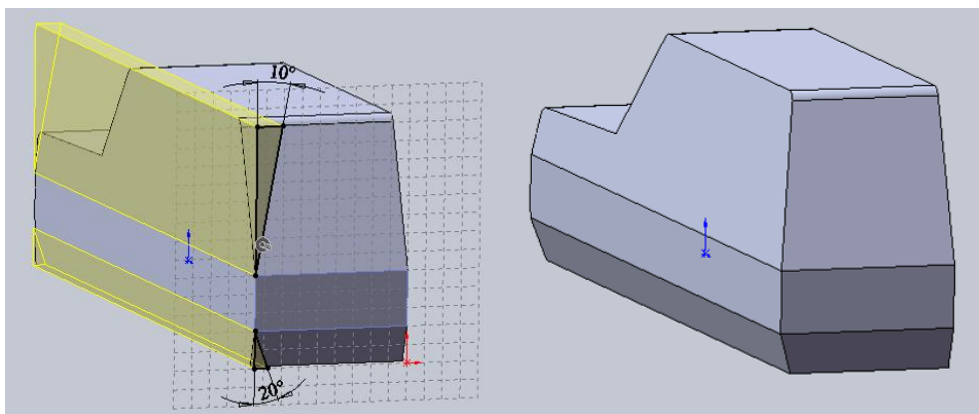
4.5.4. Проводимо екструзію сформованого в ескізі перерізу на половину ширини автомобіля, а саме на 850 мм:



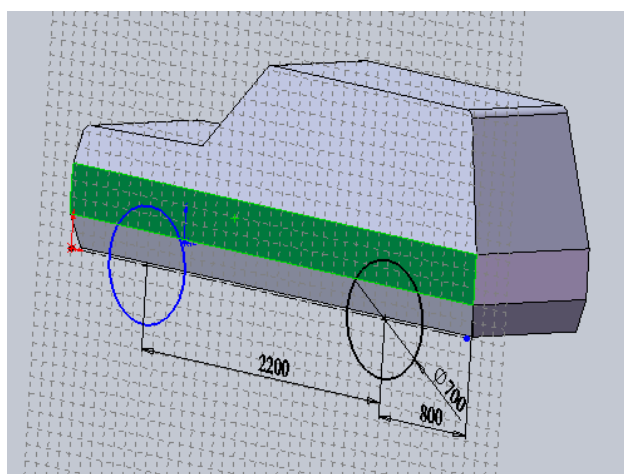
4.5.5. На задній поверхні сформуємо ескіз для наступного формування бокових поверхонь:



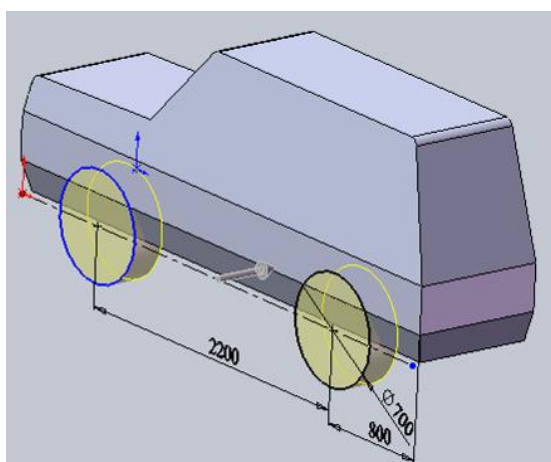
4.5.6. Проводимо видалення видавлюванням вказаного ескізу крізь усю сформовану твердо тільки модель **Extruded Cut**:



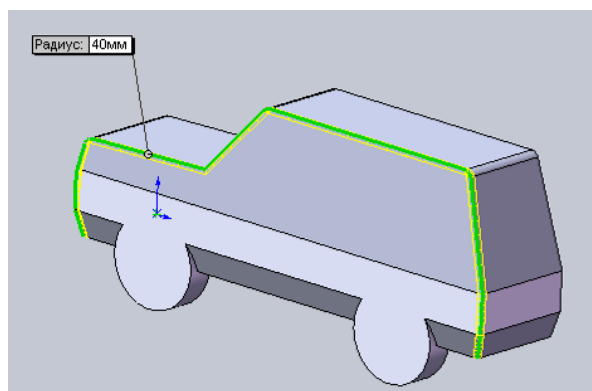
4.5.7. Формуємо ескіз для завдання коліс автомобілю (темним вказана поверхня, на якій безпосередньо формується ескіз):



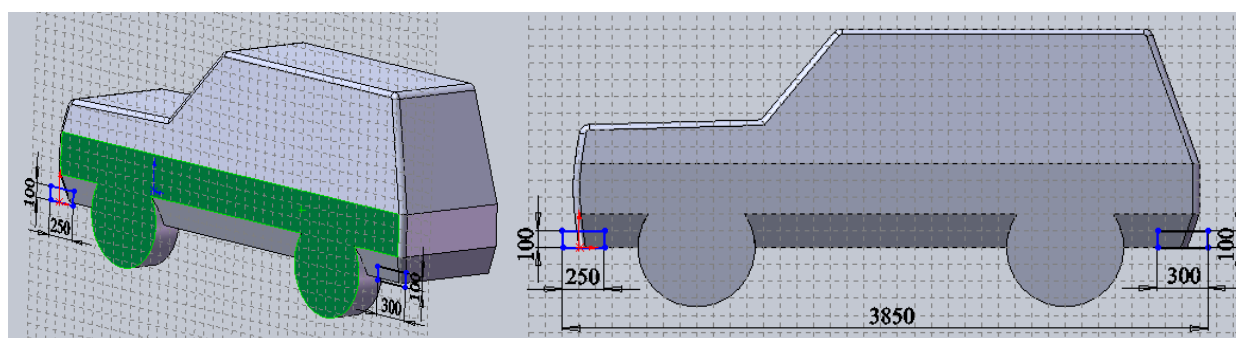
4.5.8. Проводимо видавлювання цього ескізу на величину, що дорівнює ширині колеса, а саме на 205 мм:



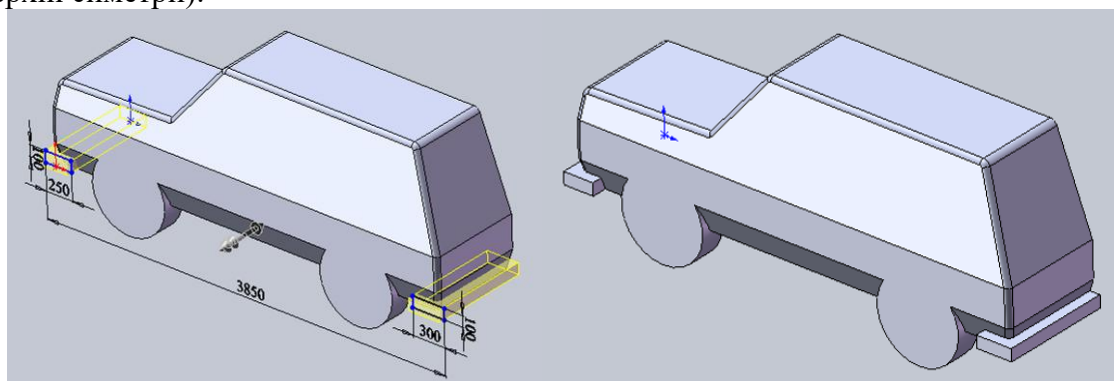
4.5.9. Проводимо заокруглення вказаних нижче кромek за допомогою команди **Insert/Features/Fillet_Round**:



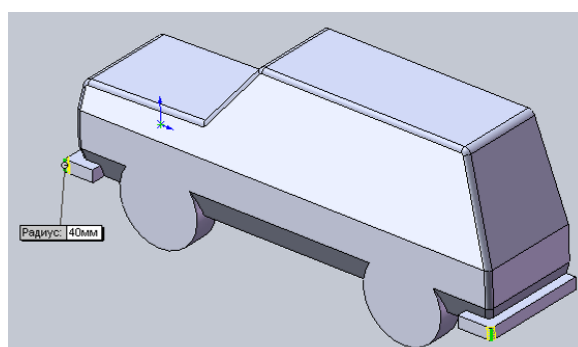
4.5.10. Формуємо ескіз для наступного завдання переднього та заднього бамперів (темним вказана поверхня, на якій безпосередньо формується ескіз, заглиблення у тверду модель проводиться на довільну невелику величину):



4.5.11. Проводимо формування екструзією попередньо сформованого ескізу, екструзія проводиться до симетричної поверхні (**To surface** з наступним виділенням поверхні симетрії):

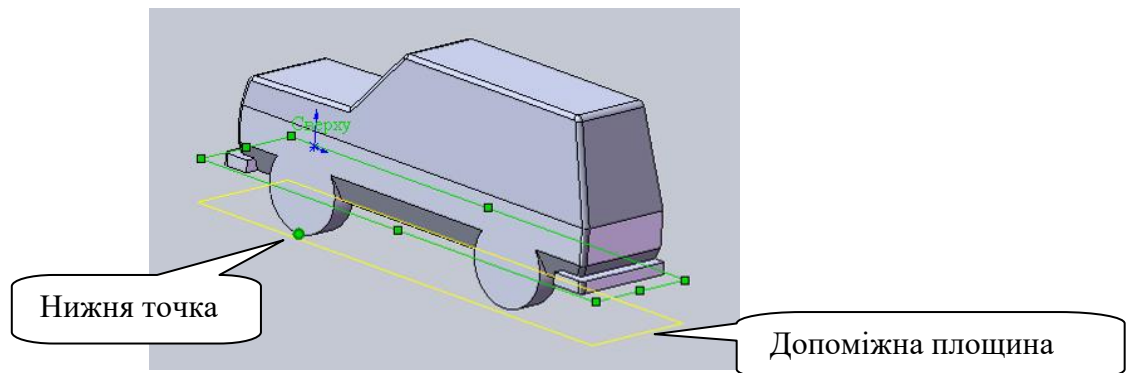


4.5.12. Проводимо заокруглення виділених крамок бамперів:

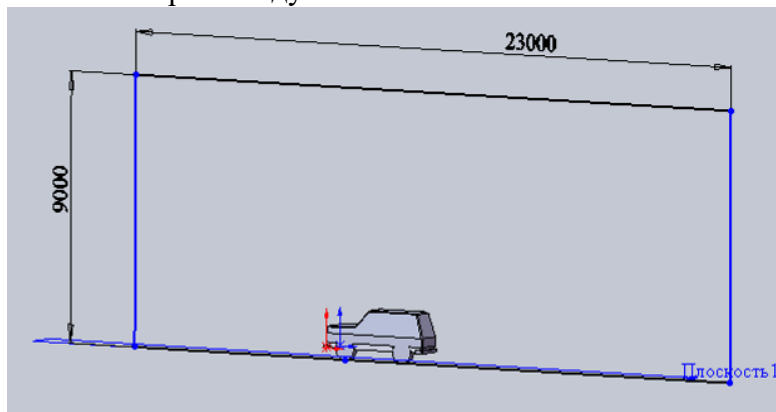


На цьому побудування безпосередньо моделі авто закінчено. Перейдемо до побудування області навколишнього повітря:

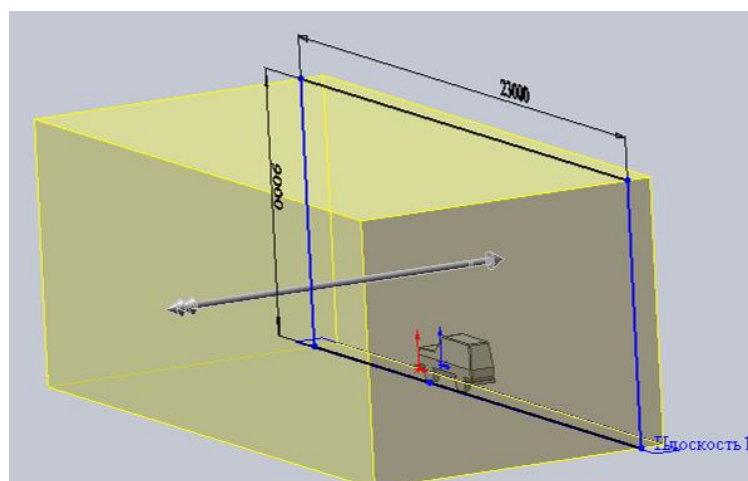
4.5.13. Створимо додаткову допоміжну площину **Головне Меню/Insert/Reference Geometry/Plane**, що проходить паралельно площині днища через нижню точку колеса:



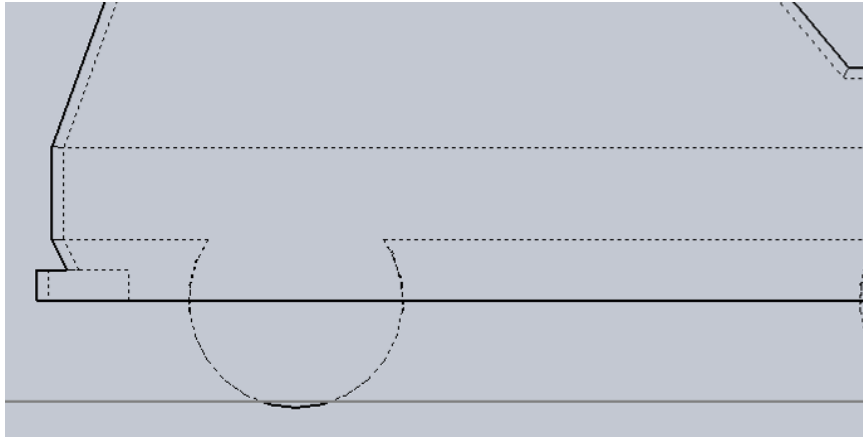
4.5.14. Перпендикулярно до побудованої допоміжної площини створимо ескіз, в якому намалюємо прямокутник, що задасть охоплюючий простір, прямокутник бажано здвинути довільним чином проти ходу авто:



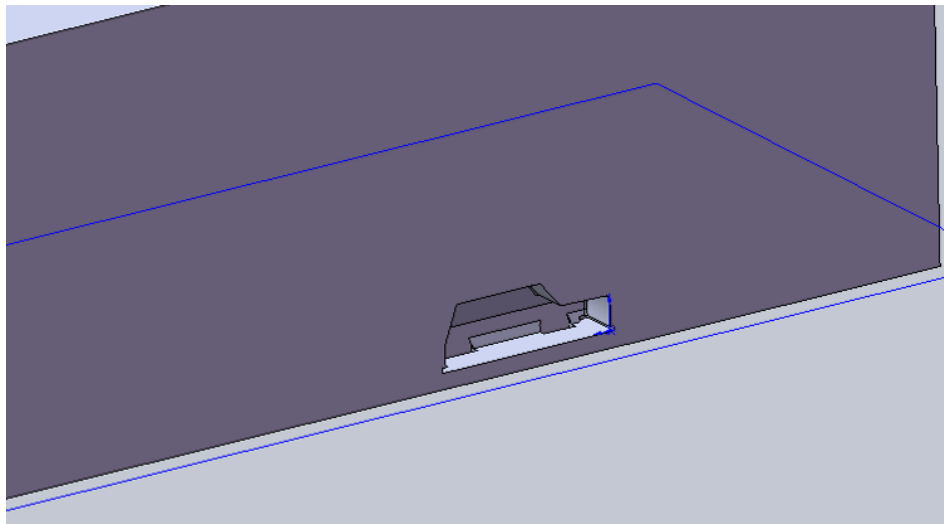
4.5.15. Проведемо видавлювання прямокутника на дистанцію порядку 10 м, при цьому обов'язково повинна бути знята помітка з **Merge result**:



4.5.16. Для формування плями контакту коліс з трасою змістимо твердо тільки модель автомобіля вниз на величину 20 мм (**Головне Меню/Insert/Features/Move_Copy**, та в вікні, що з'явилося, вкажемо тіло, що переміщується, відстань — 20мм за необхідною віссю):



4.5.17. Проведемо вирахування об'єму автомобіля з об'єму повітря **Головне Меню/Insert/Features/Combine**, та в вікні, що з'явилося, вкажемо **Subtract**, в позиції **Main Body** вкажемо паралелограм, в позиції **Bodies to Subtract** вкажемо твердотільну модель автомобілю, в результаті отримаємо об'єм, безпосередньо зайнятий повітрям:



Контрольні питання.

1. Що таке багатотільна модель у CAD-системах?
2. Що таке примітиви в CAD-системах? Наведіть приклади.
3. Які типи булевських операцій можна виконувати над окремими тілами багатотільної моделі?
4. Які переваги надає багатотільне моделювання при розробці складних виробів або зборок?
5. Опишіть операції замітання та скінінгу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Генератори сіток. Загальні принципи

5.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок роботи в генераторах сіток.

Задача роботи — формування файлу сітки моделі на основі створеної в CAD геометрії.

5.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сучасні вимоги до виробництва передбачають створення нових, більш якісних продуктів за короткий термін і з меншими витратами. Це обумовлює логічну потребу в широкому використанні комп'ютерних технологій — зокрема, їх значної обчислювальної потужності, великих обсягів пам'яті та зручних інтерфейсів — для автоматизації та інтеграції процесів проєктування і виготовлення. Такий підхід дозволяє істотно зменшити терміни розробки й знизити витрати на виробництво.

Розглянемо приклад: у більшості реальних інженерних конструкцій зустрічаються складні геометричні форми та різномірні матеріали. Виконати точний розрахунок напружень у такому елементі, як кронштейн, із застосуванням традиційних аналітичних методів — надзвичайно складне завдання.

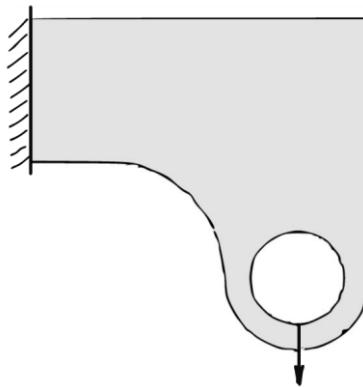


Рис. 5.1. Кронштейн з навантаженням.

Якщо ж кронштейн виготовлений з композитного матеріалу зі складними властивостями, задача стає практично нерозв'язною. Непереборні ускладнення виникають й при спробі вивести аналітичне вираження для розподілу температур, наприклад, у двигуні внутрішнього згоряння.

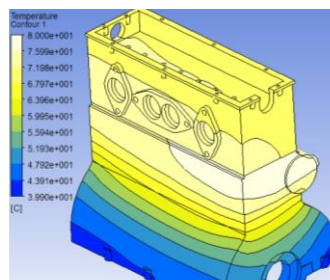


Рис. 5.2. Розподіл температур у двигуні внутрішнього згоряння.

На сьогоднішній день подібні завдання легко вирішуються засобами систем автоматичного проектування — САПР. Винятковий ріст обчислювальної здатності комп'ютерів та широке поширення програмного забезпечення для проектування й виробництва привели до того, що інженери можуть використати такі системи для рішення найрізноманітніших завдань.

У сучасному проектуванні подібні програмні пакети автоматизованого конструювання дозволяють оцінювати проекти на кожному етапі процесу розробки. Наприклад, вони дозволяють аналізувати кінематику або динаміку поводження проєктованого агрегату. До цієї категорії відносяться такі пакети, як **ADAMS** та **DADS**. З погляду цих пакетів кожний компонент агрегату розглядається як тіло із зосередженою масою. У деяких випадках засоби САПР дозволяють визначити розподіл напруг або температур у системах, розрахованих на фізичне або теплове навантаження. Можливо також проведення вібраційного аналізу компонента, на який буде впливати динамічне навантаження. Прикладами комерційних програм подібного аналізу є **NASTRAN**, **ANSYS**, **COMSOL**.

Більшість зазначених продуктів використовують при розрахунках так звані *метод скінченних елементів* та *метод скінченних об'ємів*. На зорі свого існування метод скінченних елементів застосовувався, головним чином, у будівельній механіці. Багато комерційних пакетів, що засновані на методі скінченних елементів, споконвічно призначалися для рішення будівельних завдань. Однак незабаром стало ясно, що зазначені методи мають більш широку область застосування: задачі теплоперенесення, розподілу електростатичного потенціалу, механіки рідин, вібраційного аналізу й багато інших. З ростом обчислювальних можливостей комп'ютерів розширився діапазон та зросла складність завдань, доступних рішенню сучасних САПР. Як приклади програм для рішення завдань механіки рідин методом скінченних елементів, можна привести пакети **C-MOLD** та **MOLDFLOW**, призначені для моделювання течії рідкого пластику у формі для лиття під тиском.

Робота перерахованих програмних продуктів будується на однакових принципах. Вона починається з апроксимації досліджуваної області (області завдання) та розбитті її на елементи *сітки*. По кутах кожного елемента перебувають вузли. Такі елементи й називаються *скінченними елементами*. Скінченні елементи можуть мати різноманітну форму, наприклад, трикутну, або чотирикутну, однак можливі й скінченні елементи інших типів.

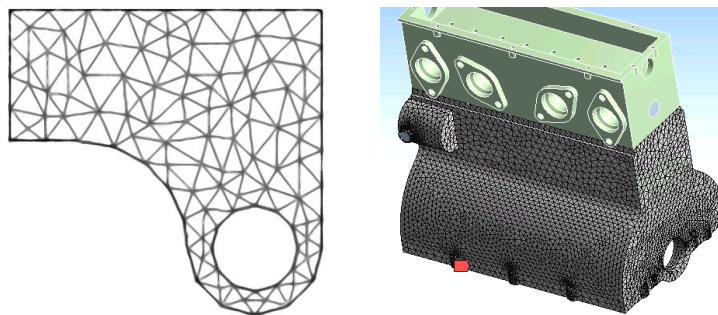


Рис. 5.2. Сітки скінченних елементів.

Після апроксимації вихідного об'єкта елементами з належною кількістю вузлів, кожному вузлу зіставляється невідома величина, що шукається в процесі рішення задачі. Наприклад, невідомими можуть бути зсуви вузлів по координатах x і y , або температура в даному вузлі.

Апроксимувавши область задачі, ми повинні задати характеристики матеріалу й граничні умови для кожного елемента. Граничні умови (переміщення, зовнішня сила або температура) звичайно задаються на зовнішній границі об'єкта. Ці умови повинні бути

виражені у вигляді значень переміщення, сили або температури в граничних вузлах деяких скінченних елементів. Після завдання граничних умов для всіх зовнішніх вузлів, програма формує систему рівнянь, що зв'язує граничні умови з невідомими, після чого вирішує цю систему відносно невідомих.

Після знаходження значень невідомих, користувач одержує можливість довідатися значення будь-якого параметра в будь-якій точці розглянутої області. Вихідні дані програми звичайно представляються в числовій формі та відображаються графічно у режимі так званого *постпроцесінгу*.

5.2.1. Сітки та сіткові генератори

Сіткові генератори — це програми для створення сітки для всебічних міждисциплінарних розрахунків.

Розрахункова (обчислювальна) сітка — сукупність точок (сіткових вузлів), заданих в області визначення деякої функції. Процедuru побудови розрахункової сітки можна розглядати як побудову взаємно-однозначного відображення області визначення функції (фізичної області) на деяку розрахункову область, що має більш просту форму.

Створення сітки є невід'ємною частиною процесу комп'ютерного інженерного моделювання (CAE). Якість сіткової моделі впливає на точність, збіжність і швидкість одержання розв'язку. Крім того, час, необхідний для створення сітки, часто займає значну частину в загальному часі виконання комп'ютерного інженерного розрахунку. Тому якісні й більш автоматизовані інструменти побудови сітки дають кращий результат.

5.2.1.1. Типи сіток.

Розрізняють різні типи сіток (рис. 5.3).

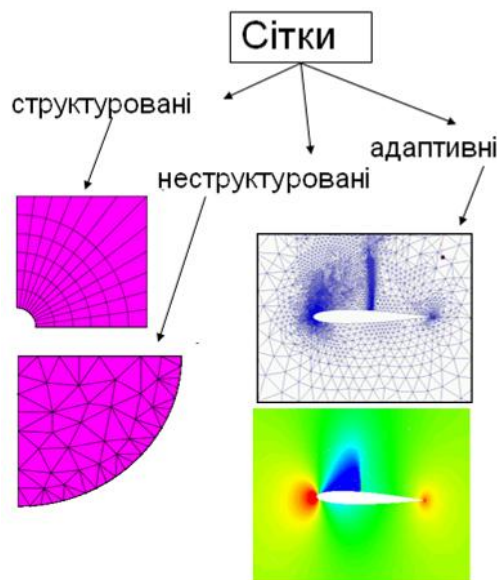


Рис. 5.3. Типи сіток скінченних елементів.

Структуровані (регулярні) сітки — це тип розрахункових сіток, у яких вузли мають впорядковане розташування. Така впорядкованість дозволяє суттєво зменшити витрати часу на чисельний розрахунок і обсяг оперативної пам'яті, необхідної для обробки задачі. Однак створення структурованої криволінійної сітки зазвичай потребує більше зусиль і ресурсів, ніж генерація неструктурованої сітки.

Неструктуровані (нерегулярні) сітки — це сітки, що складаються з простих геометричних елементів (наприклад, трикутників або тетраєдрів), які можуть мати

довільне розташування в просторі. Вони особливо корисні в задачах скінченноелементного аналізу, коли форма об'єкта складна або нерівномірна. Для побудови таких сіток часто застосовується *алгоритм Рамперта*, який дозволяє розбивати складні полігональні області на сітку трикутників.

Адаптивні сітки. У задачах з розривними розв'язками (наприклад, в задачах надзвукової газодинаміки) розрахункова область характеризується наявністю різномасштабних елементів складної неоднорідної структури. Досить великі зони мають малі або помірні градієнти параметрів розв'язку. Разом з тим зустрічаються порівняно вузькі області, градієнти параметрів розв'язку в яких досягають більших величин. Це — ударні хвилі, контактні розриви, прикордонні шари. Для одержання достовірного чисельного розв'язку завдань такого типу необхідно використовувати розрахункові сітки з малими просторовими кроками. Обчислювальні витрати при цьому стають настільки значними, що через обмеження обчислювальної техніки не завжди вдається одержати досить точний розв'язок задач. У подібних випадках стає бажаним застосування динамічно адаптивних сіток, що дозволяють використання малих просторових кроків сітки, де це необхідно, для дотримання вимог до чисельних методів, але при цьому зберігаючи помірні вимоги до обчислювальної техніки. Методи динамічно адаптивних сіток є одним з найбільш ефективних підходів для підвищення точності чисельного розв'язку в розрахункових областях з декількома просторовими масштабами, що відбивають неоднорідну структуру розв'язку. Основна ідея методів динамічно адаптивних сіток полягає в зменшенні розмірів комірок у тих зонах розрахункової області, у яких виникають найбільші помилки розв'язку. У зв'язку з тим, що в більшості випадків шуканий розв'язок невідомий і неможливо визначити похибку, що представляє собою різницю точного й наближеного розв'язку в деякій нормі, то в якості параметру похибки розв'язку найчастіше використовують градієнти або різниці параметрів розв'язку.

Ортогональні й ортогоналізовані сітки. Для одержання розв'язку диференціального рівняння, що має необхідну точність при мінімальних витратах ресурсів ЕОМ, розрахункова сітка повинна мати рядок властивостей. Зокрема, як показує досвід багатьох дослідників, розрахункові комірки повинні мати малу скошеність, тобто розрахункова сітка повинна бути, по можливості, ортогоналізованою. Завдання побудови багатовимірної ортогоналізованої розрахункової сітки формулюється як задача про мінімізацію функціонала $I = \int \omega Q dV$, де ω — вагова функція, Q — параметр ортогональності сітки. У якості параметру Q може бути використана сума скалярних добутків дотичних до координатних ліній сітки. Можна показати, що варіаційна задача про побудову ортогоналізованої розрахункової сітки зводиться до крайової задачі для системи диференціальних рівнянь Пуассона. Як відомо, система рівнянь Пуассона при заданих граничних умовах описує розподіл тепла в розглянутому об'ємі, що дозволяє розраховувати на одержання гладких сіткових ліній, навіть у тих випадках коли границі фізичної області мають злами. Принцип максимуму, слухний для еліптичних рівнянь, гарантує, що максимальні й мінімальні значення розрахункових координат будуть досягатися на границях області. Оскільки використовується система еліптичних рівнянь, у якості граничних умов повинні задаватися або координати вузлів сітки на границях (*умова Діріхле*) або нахил координатних ліній на границях (*умова Неймана*).

5.2.2. Основні сіткові генератори.

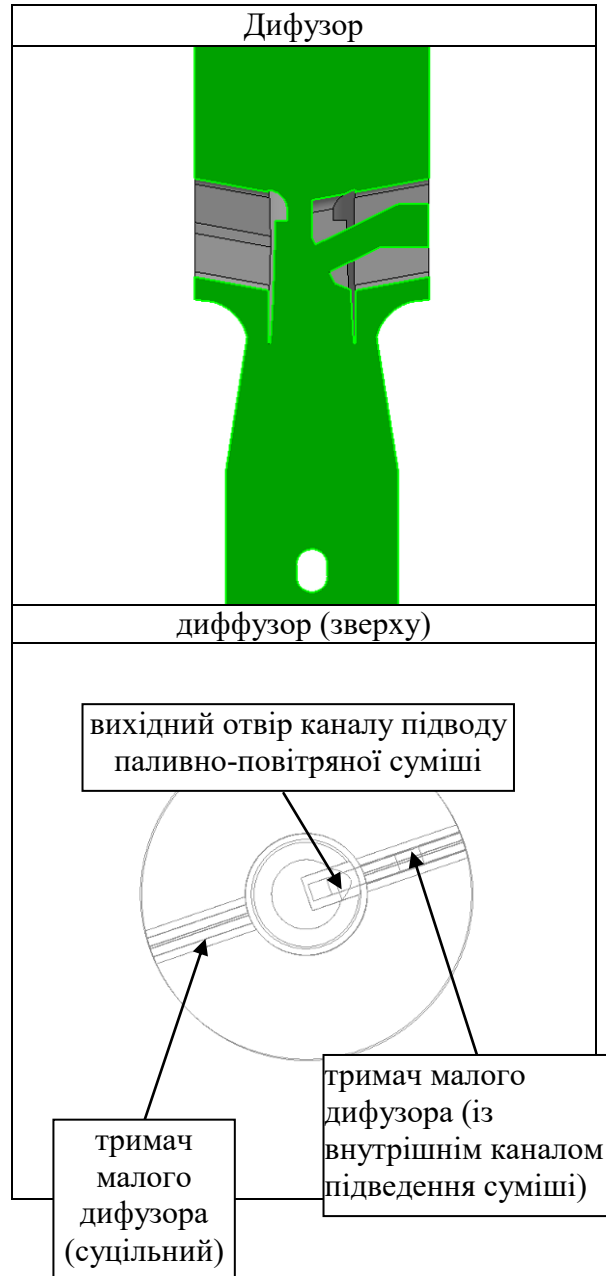
Основні сіткові генератори представлені наступними програмними продуктами:

- ICEM CFD;
- ANSYS Mesh;
- CFX-Mesh;
- Fluent Gambit;
- Fluent-Mesh;

Ремар.

5.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступного сіткового генератору створити неструктуровану сітку для геометрії дифузору карбюратора:



Врахувати необхідність в наступних розрахунках моделювання пограничного шару — створити на границях 10 шарів призматичних комірок.

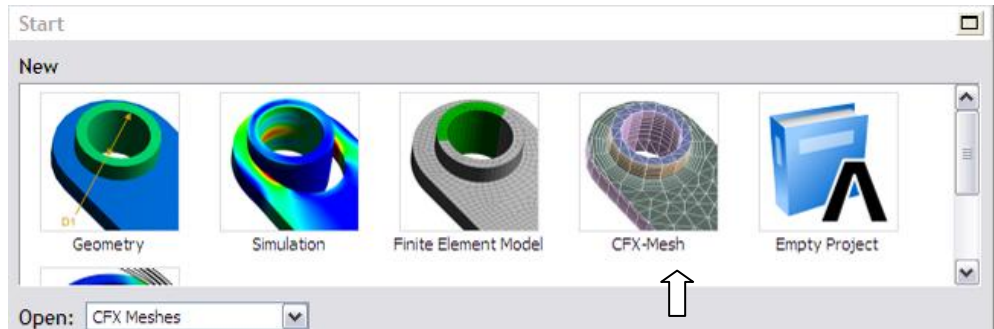
5.4. ХІД РОБОТИ

- 5.4.1. Імпортувати в генератор сіток геометрію внутрішнього простору дифузору;
- 5.4.2. Перевірити параметри сітки за замовчанням та провести попереднє розбиття;
- 5.4.3. Перевірити якість сітки, змінити відповідні параметри розбиття та перегенерувати сітку;
- 5.4.4. Вказати поверхні для пограничного шару та створити інфляцію;

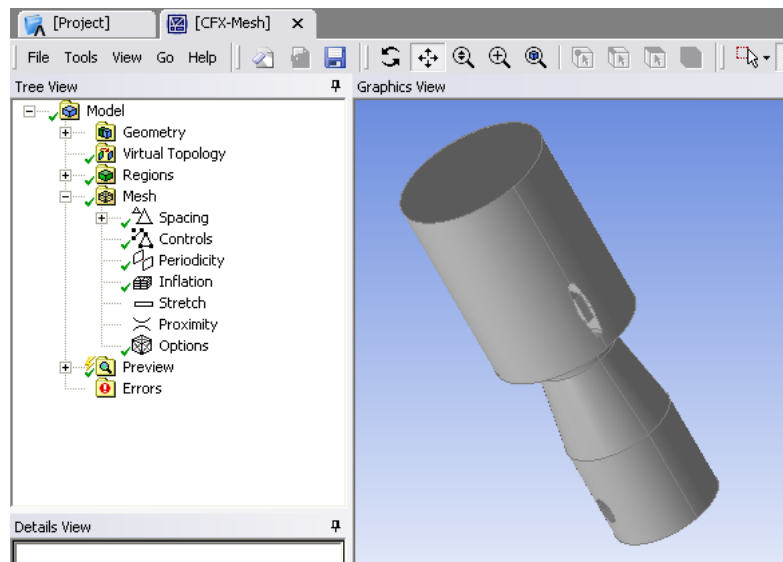
5.4.5. Надати назви поверхням відповідно до граничних умов задачі.

5.5. Приклад виконання завдання в середовищі CFX-Mesh

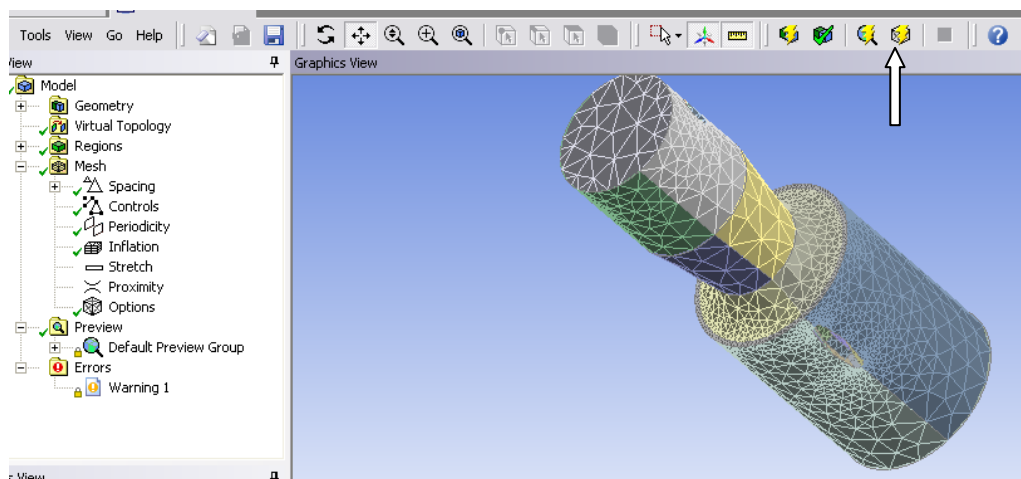
5.5.1. Запускаємо CFX-Mesh із середовища ANSYS Workbench:



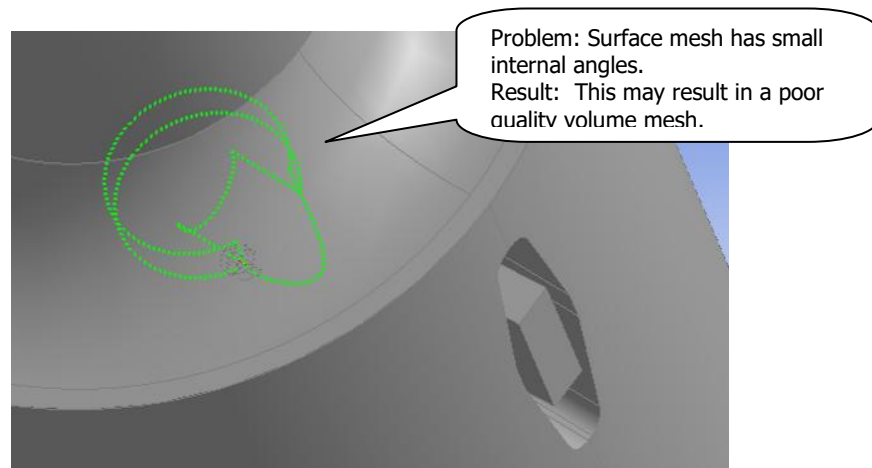
5.5.2. У діалозі, що з'явився, вказуємо *нейтральний* файл геометрії (у форматі IGES, див. наступну л.р.) каналу дифузора diffuser.igs:



5.5.3. Проведемо попереднє формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh:



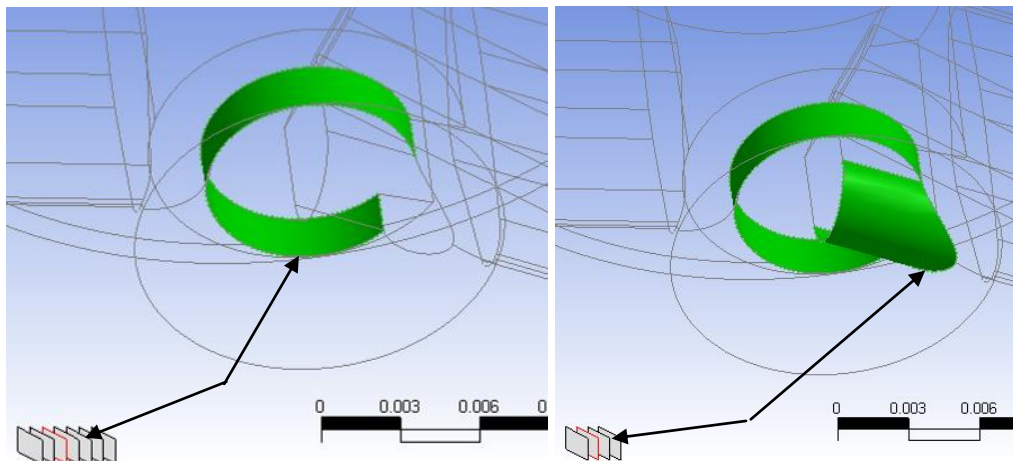
5.5.4. В дереві побудування в позиції Errors виділимо попередження Warning, що автоматично підсвітить проблемну геометрію:



5.5.5. Висвітімо проблемні поверхні окремо. Перейдемо в каркасний режим роботи: Головне меню/ View / Wireframe Display. В дереві побудування виділимо позицію Preview та за допомогою правої кнопки миші в позиції Insert вкажемо Preview Group. Змінимо режим інтерактивного вибору елементів геометрії з Box Select на Flood Select,



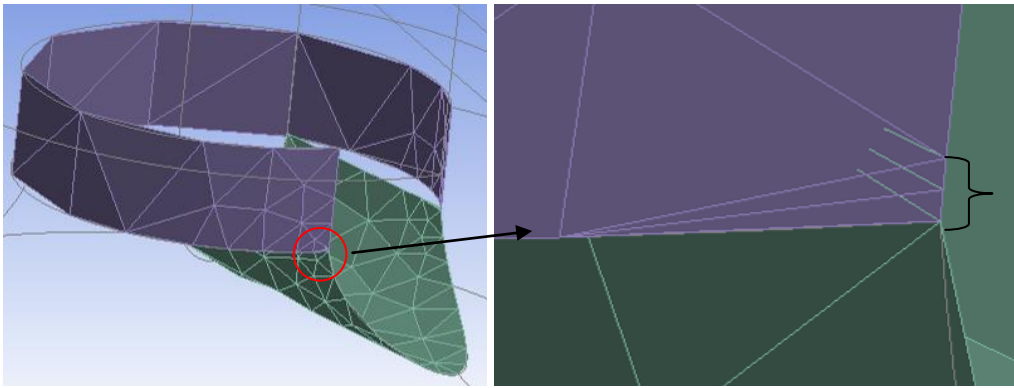
та клацнемо на екрані навпроти висвітленої поверхні. Переключенням шарів виберемо необхідну поверхню. Для вибору більш ніж одної поверхні утримуємо клавішу Ctrl та вказуємо нову геометрію перемиканням шарів:



Тиснемо Apply в позиції Location меню Detail View:

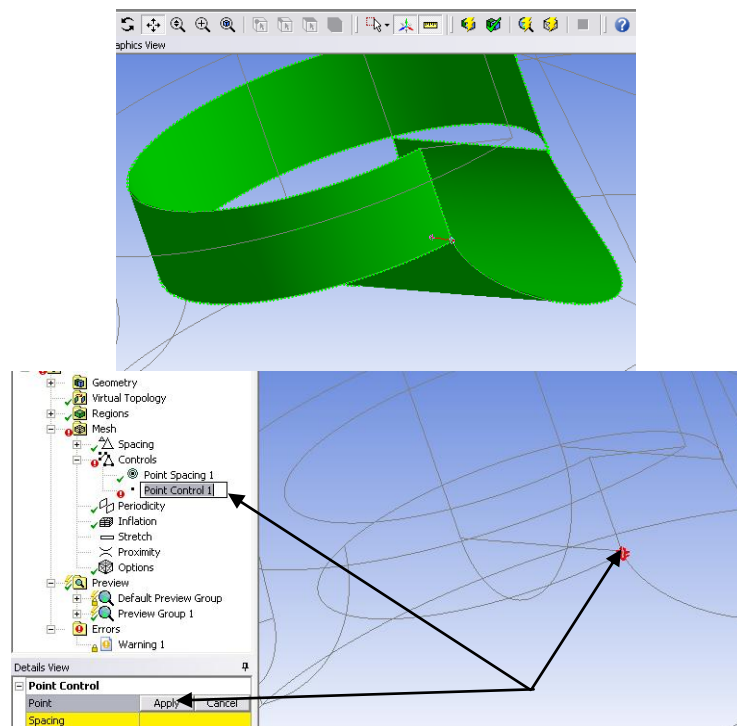


Розглядаючи розбиття вибраних поверхонь, робимо висновок про наявність вузьких трикутників на місці стику поверхонь, що потребує виправлення:

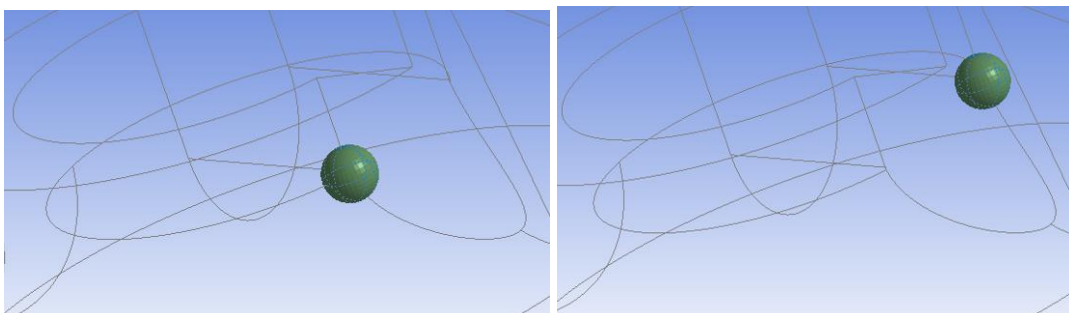


Вказана ситуація викликана малою гранню, що вказана фігурною дужкою.

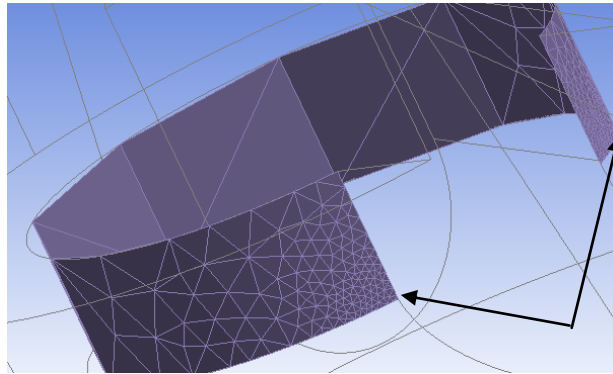
5.5.6. В позиції Mesh дерева побудування в опції Controls правою кнопкою миші зробимо вставку Insert параметрів впливу на локальне згущення сітки Point Spacing та вкажемо в позиції Length Scale величину 0.0001 м. Radius of Influence меню Detail View величину 0.00055. Натиснемо Enter. Також в позиції Mesh дерева побудування в опції Controls правою кнопкою миші зробимо вставку Insert впливової точки Point Control:



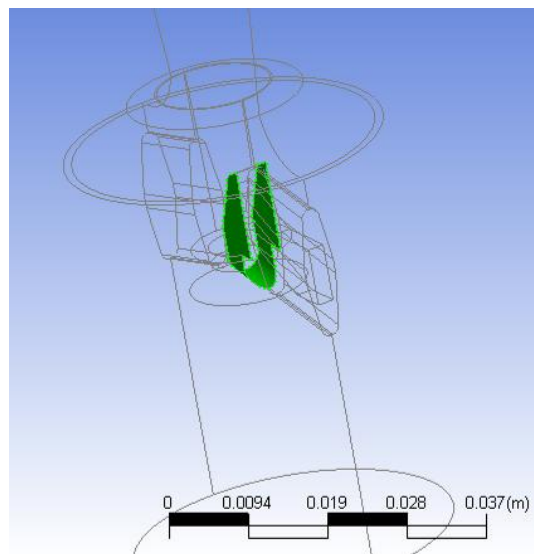
та натиснемо Apply в позиції Location меню Detail View. Для позиції Spacing вкажемо строку Point Spacing 1 безпосередньо з дерева проєкту, також натиснемо Apply. Отримаємо сферу згущення сітки біля точки. Аналогічно вказуємо точку з іншого боку:



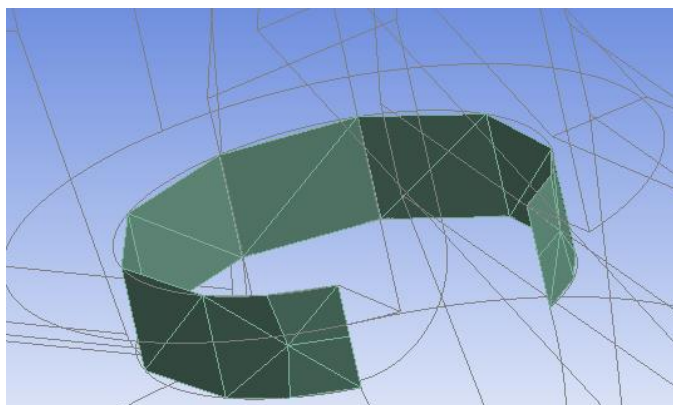
5.5.7. Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. За новим розбиттям помилок не виявлено, та в Preview Group бачимо помітне згущення сітки:



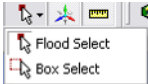
5.5.8. Вказане згущення може бути аналогічним чином побудоване уздовж кривої (Controls -> Insert -> Line Control), або уздовж поверхні (Controls -> Insert -> Face Control). Але, у зв'язку з тим, що попередні помилки викликані малими гранями, є можливість не запобігати до згущення сітки, а провести просте ігнорування при побудованні сітки коротких граней. Для запровадження цього алгоритму спочатку видалимо побудовані Point Control 1 та Point Control 2 з дерева побудування (права кнопка миші та опція Delete). Далі скористаємося віртуальною топологією моделі в дереві побудування. Зробимо вставку Insert в позиції Virtual Topology в дереві проєкту: Virtual Topology-> Insert -> Virtual Faces, та виберемо за засобом пошарового вибору з використанням клавіші Ctrl поверхні, що вказані нижче:

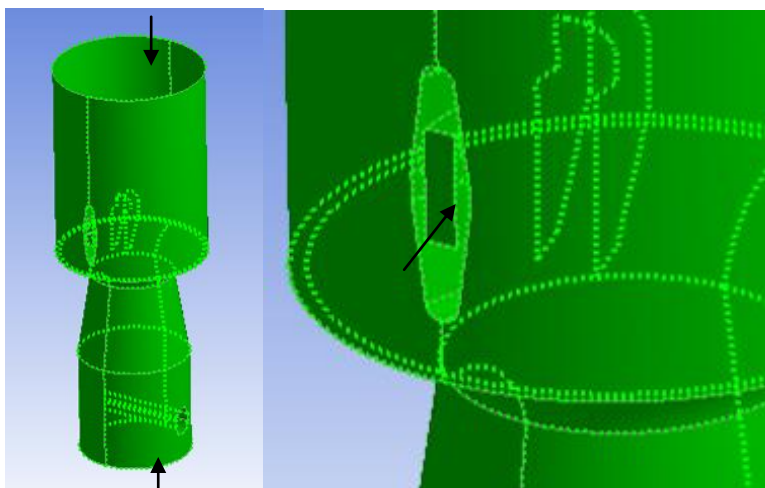


5.5.9. Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. За новим розбиттям помилок не виявлено, та в Preview Group немає вузьких трикутників:



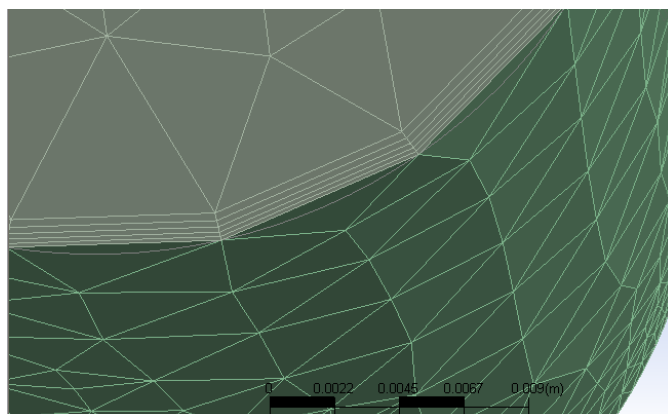
5.5.10. Проведемо вставку пограничного шару. Для цього в дереві проєкту зробимо вставку Insert в позиції Inflation -> Inflation Boundary. За допомогою способу вибору

об'єктів Box Select  виділимо усі об'єкти геометричної моделі, та потім утримуючи клавішу Ctrl знімемо непотрібні виділення зі входу повітря, виходу та входу суміші, натискуємо Apply:



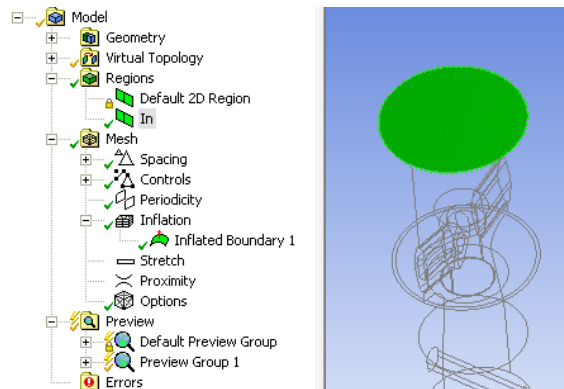
Вказуємо параметр Maximal Thickness 0.001.

5.5.11. Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. Бачимо на поверхнях наявність шарів призматичних комірок:

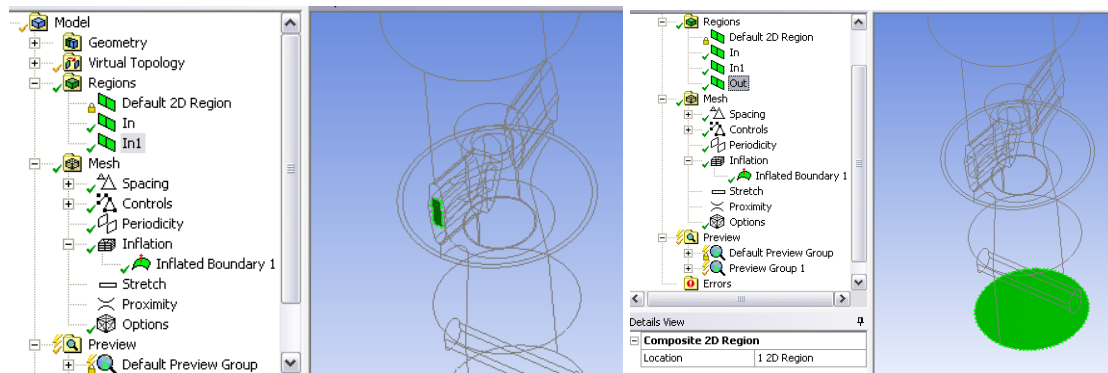


5.5.12. За необхідністю проводиться корегування характерного розміру комірки сітки за рахунок параметру Spacing.

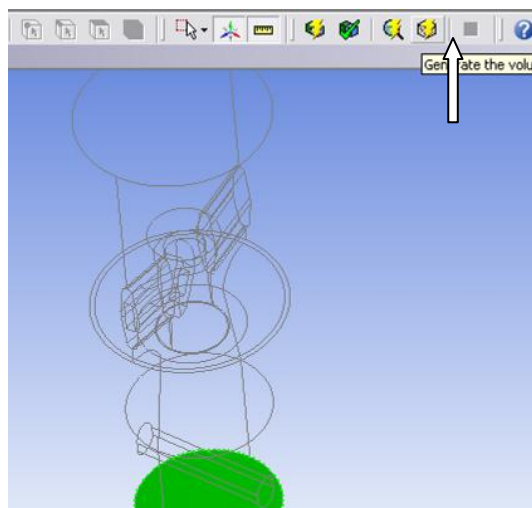
5.5.13. Надамо назви необхідним поверхням з дерева проєкту: Regions -> Insert -> Composite 2D Region, та вказуємо вхід — In (використовуємо Rename за правою кнопкою миші на імені, що з'явилося за замовчанням):



5.5.14. Аналогічно задаємо вхід та вихід суміші:



5.5.15. Проводимо генерацію та збереження отриманої сітки:



Контрольні питання.

1. Що таке сітка (mesh) у контексті САПР і для чого вона використовується?
2. Які існують основні типи сіток, в чому їхні відмінності?
3. Які елементи можуть використовуватись у сітках?
4. Що таке щільність сітки та як вона впливає на точність та швидкість розрахунків?
5. Що означає адаптивна (локальна) генерація сітки та коли її доцільно застосовувати?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Генератори сіток. Інфляція призматичних комірок

6.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок роботи в генераторах сіток.

Задача роботи — формування файлу сітки моделі на основі створеної в CAD геометрії.

6.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Різні системи зберігають дані технічних вимог у структурах різного виду, тому для перенесення даних, наприклад, з CAD програми до сіткового генератору, необхідно перетворити дані технічних вимог однієї системи у формат іншої системи. Ще один конвертер необхідний для перенесення даних між двома системами в протилежному напрямку. Отже, для кожної пари систем необхідно мати два конвертери.

Однак, обмін даними можна забезпечити, якщо ввести нейтральну структуру бази даних, яка має назву *нейтральний файл*, та була б незалежна від існуючих САПР. Ця структура буде діяти як проміжна ланка комунікації між різними структурами баз даних САПР. У такий спосіб у кожній системі буде своя пара конвертерів для експорту й імпорту даних у цей нейтральний формат. Розглянемо деякі основні типи нейтральних файлів.

6.2.1. Формат IGES

У 1979 році перед технічним комітетом, до якого входили представники компаній **Boeing, General Electric, Xerox, Computervision і Applicon**, а також група користувачів і постачальників CAD-систем за підтримки Національного інституту стандартів і технологій США (нині — NIST), Міністерство оборони США поставило завдання створити єдиний формат обміну даними в межах програми автоматизованого інтегрованого виробництва (ICAM), розробленої для потреб ВПС США. Результатом цієї ініціативи стало створення першої версії формату **IGES** (Initial Graphics Exchange Specification), яка була офіційно опублікована у січні 1980 року.

Вже в 1981 році цей формат отримав статус національного стандарту завдяки схваленню Американським національним інститутом стандартів (**ANSI**). З 1988 року Міністерство оборони США зобов'язало переводити всю цифрову виробничу документацію, зокрема інженерні креслення, схеми та інші графічні матеріали, у формат IGES. Відповідно, всі постачальники програмного забезпечення для CAD/CAE/CAM-систем, які прагнули співпрацювати з Міністерством оборони та його підрядниками, були змушені забезпечити підтримку зчитування й збереження даних у цьому форматі.

Формат **IGES** став основою для уніфікації цифрової виробничої інформації в таких галузях, як автомобілебудування, авіація, суднобудування та оборонна промисловість. Передбачалося, що створені моделі зберігатимуть актуальність десятиліттями, навіть у випадках, коли компанії-розробники припинять свою діяльність — файли IGES мали забезпечити довгостроковий доступ до необхідної інформації.

Однак після виходу першої версії стандарту **STEP (ISO 10303)** у 1994 році, інтерес до розвитку IGES почав поступово згасати. Останньою опублікованою версією IGES стала версія 5.3, яка вийшла у 1996 році.

Варто зазначити одну цікаву особливість IGES: починаючи з версії 4.0, технічна документація самого стандарту створювалася з використанням цього ж формату — тобто,

IGES став першим ANSI-стандартом, який «описував сам себе». Ілюстрації для друкованої версії автоматично генерувалися з IGES-файлів, оброблялися засобами верстки **LaTeX**, де поєднувалися растрові зображення з PostScript-даними, і друкувалися як єдиний документ. Починаючи з версій 5.2 і 5.3, стандарт був доступний у форматі PDF.

6.2.2. Формат DXF

Формат **DXF (Drawing Interchange Format)** був розроблений для забезпечення зручного обміну даними між **AutoCAD** та іншими системами автоматизованого проєктування. Його метою було надати користувачам можливість зберігати креслення AutoCAD у такому вигляді, який можна було б відкривати та використовувати в сторонньому програмному забезпеченні. Вперше формат був представлений у грудні 1982 року разом з AutoCAD версії 1.0 як відкритий альтернативний формат до внутрішнього, закритого формату DWG, специфікація якого не оприлюднювалася.

На офіційному сайті компанії **Autodesk** наразі доступні специфікації **DXF**, починаючи з версії **AutoCAD Release 13**. Починаючи з релізу AutoCAD 10 (жовтень 1988 року) окрім текстового формату **DXF** було запроваджено також бінарну версію — **DXB**.

З розвитком AutoCAD і появою в ньому складніших типів об'єктів, формат DXF почав втрачати універсальність: деякі нові елементи описувалися недостатньо повно або взагалі не підтримувалися. Через це багато розробників комерційних програм, у тому числі конкуренти Autodesk, для обміну даними з AutoCAD почали орієнтуватися на DWG-формат, використовуючи бібліотеки, розроблені некомерційною організацією **Open Design Alliance**, яка виконала зворотне проєктування DWG.

Проте, для більшості прикладних задач — наприклад, створення креслень відповідно до вимог ЄСКД, де застосовуються лише двовимірні контурні зображення — можливостей DXF цілком достатньо. Саме тому цей формат не тільки залишився актуальним, але й зайняв одне з провідних місць серед відкритих стандартів для векторної графіки у вільному програмному забезпеченні. Іншим широко поширеним форматом є **SVG**.

6.2.3. Формат STEP

Формати **IGES** і **DXF** спочатку створювались переважно для обміну технічною інформацією, а не повноцінними даними про продукт. Під даними про продукт слід розуміти всю інформацію, що супроводжує виріб протягом усього його життєвого циклу — від етапів проєктування та виготовлення до контролю якості, випробувань та обслуговування. Незважаючи на спроби розширити можливості **IGES** і **DXF** для включення частини таких даних, вони все ж не здатні охопити повний спектр інформації, необхідної для моделювання життєвого циклу продукту.

З огляду на це, у США в 1983 році було ініційовано розробку нового стандарту під назвою **PDES (Product Data Exchange Specification)**, основним завданням якого був обмін саме даними про продукт, а не лише технічними вимогами. **PDES** передбачав мінімізацію участі людини в процесі передавання інформації, тобто мав на меті усунути залежність від креслень та паперової документації при передачі даних між різними CAD-системами або іншими інженерними програмами.

У 1984 році Міжнародна організація зі стандартизації (**ISO**) створила технічний комітет **TC184** (промислова автоматизація) та його підкомітет **SC4**, відповідальний за розробку єдиного міжнародного стандарту обміну інформацією про моделі продуктів. Так з'явився проєкт **STEP (Standard for the Exchange of Product model data)**. Оскільки цілі **PDES** і **STEP** повністю збігалися, у 1985 році Керівний комітет **IGES** ухвалив рішення, що **PDES** буде представляти інтереси США у програмі **STEP**.

Таким чином, **STEP** — це міжнародний стандарт **ISO**, розроблений для цифрового подання та обміну інженерною інформацією. Його головна мета — забезпечити уніфікований підхід до представлення даних про виріб на всіх етапах його життєвого циклу, незалежно від програмного забезпечення, яке використовується. Формат **STEP** активно застосовується для обміну даними між **CAD**-, **CAM**-, **CAE**- і **PDM**-системами. Моделі в цьому форматі описуються мовою **EXPRESS**, а сам обмін здійснюється у вигляді **Step**-файлів, **STEP-XML** або за допомогою прямого доступу до бази даних. Для конкретних сфер застосування використовуються так звані прикладні протоколи (**Application Protocols, AP**), які визначають структуру й зміст моделей.

Сьогодні інтерес до **STEP** стрімко зростає, оскільки він розглядається як важлива складова системи стандартів технології **CALS** (безперервне постачання і інформаційна підтримка життєвого циклу продукції).

6.2.4. Формат VRML

VRML (Virtual Reality Modeling Language) — це текстовий формат файлів, який дозволяє описувати тривимірні сцени. У ньому можна задавати координати вершин і граней полігональних об'єктів, а також визначати властивості поверхонь — такі як колір, текстури, прозорість, блиск тощо. Окрім цього, окремі елементи сцени можуть бути пов'язані з веб-ресурсами через **URL**-посилання, що дозволяє відкривати інші веб-сторінки або **VRML**-файли при взаємодії користувача з 3D-об'єктами.

У **VRML** можна створювати анімації, додавати звукові ефекти, налаштовувати освітлення та інші елементи віртуального середовища, які реагують на дії користувача або зовнішні події, такі як таймери. Особливий вузол **Script** дає змогу вбудовувати програмний код (наприклад, на **Java** або **JavaScript**), що дозволяє додатково розширити функціональність сцени.

VRML-документи мають розширення **.wrl** і часто називаються «світами». Технологія була вперше представлена Девом Раджеттом на Першій міжнародній конференції з **World Web** у 1994 році. Найбільшої популярності **VRML** досяг після релізу версії 2.0 у 1997 році, коли його почали активно використовувати на персональних сайтах. Проте з 1998 року подальший розвиток **VRML** припинився, тоді як технології інтерактивної 3D-графіки продовжували стрімко еволюціонувати.

Пізніше організація **VRML Consortium** була перейменована на **Web3D Consortium** і почала роботу над наступником **VRML** — форматом **X3D**. Незважаючи на зупинку активної розробки, **VRML** все ще використовується, зокрема як формат обміну 3D-моделями у системах автоматизованого проектування (**САПР**).

6.2.5. Формат Parasolid

Parasolid — це комерційне ядро геометричного моделювання, яке розробляється та підтримується компанією **Siemens PLM Software**. Його використовують у таких продуктах **Siemens**, як **NX**, **Solid Edge**, **Femap** і **Teamcenter**, а також воно ліцензується стороннім розробникам програмного забезпечення та кінцевим користувачам.

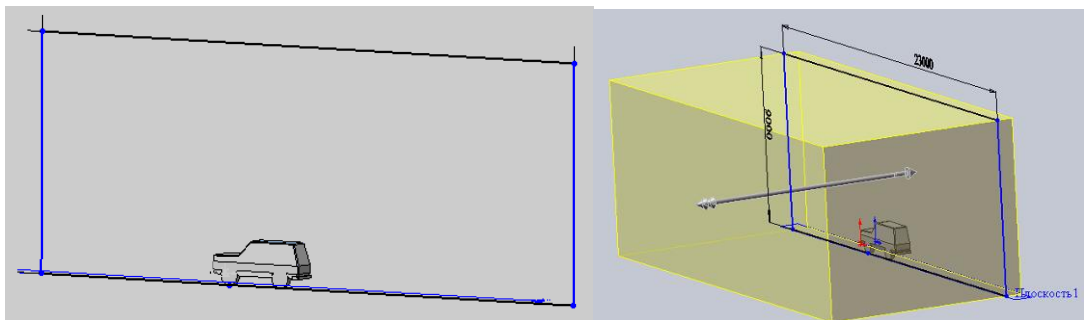
Основне призначення **Parasolid** — забезпечити точне математичне представлення тривимірної геометрії об'єктів і надати інструменти для керування цими моделями. Геометричні дані, створені за допомогою ядра, широко застосовуються в **САПР (CAD)**, системах підготовки виробництва (**CAM**) і в інженерному аналізі (**CAE**) для моделювання окремих компонентів, деталей і збірок.

Parasolid оптимізовано для багатопроцесорних систем (**SMP**) і має великий набір об'єктно-орієнтованих інструментів, сумісних із операційними системами **Windows**, **UNIX** та **Linux**.

Для забезпечення сумісності між різними додатками і платформами використовується концепція обміну даними, яка отримала назву "**Parasolid Pipeline**". У її межах моделі передаються у форматі **.x_t** (текстовий відкритий формат), або у **.x_b** (двійковий формат, менш залежний від типу обладнання й менш схильний до помилок при передачі даних). Такий підхід гарантує стабільну інтеграцію між внутрішніми і сторонніми програмними рішеннями.

6.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступного сіткового генератора створити неструктуровану сітку для геометрії попередньо зробленої моделі для розрахунку аеродинамічного опору автомобіля:



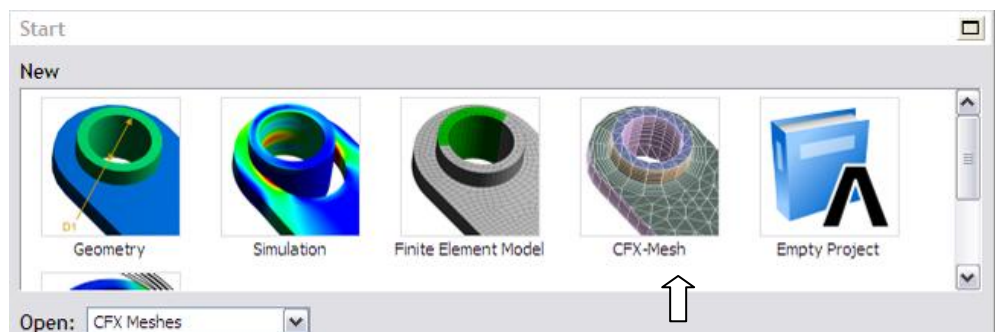
Врахувати необхідність в наступних розрахунках моделювання пограничного шару — створити на границях 10 шарів призматичних комірок на поверхнях, що відповідають кузову автомобіля.

6.4. ХІД РОБОТИ

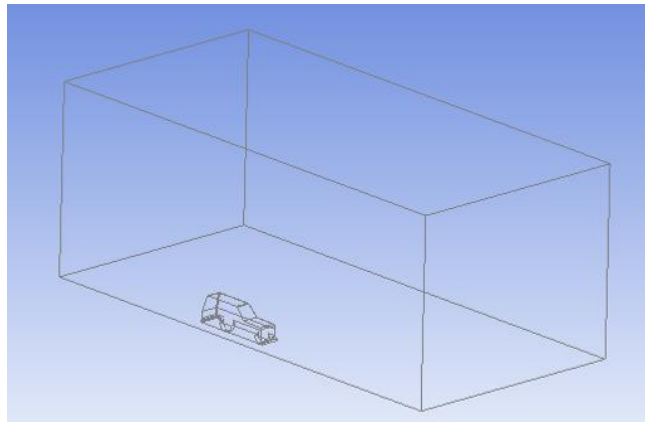
- 6.4.1. Імпортувати в генератор сіток геометрію попередньо створеного простору;
- 6.4.2. Перевірити параметри сітки за замовчанням та провести попереднє розбиття;
- 6.4.3. Перевірити якість сітки, змінити відповідні параметри розбиття та перегенерувати сітку;
- 6.4.4. Вказати поверхні для пограничного шару та створити інфляцію;
- 6.4.5. Надати назви поверхням відповідно до граничних умов задачі.

6.5. Приклад виконання завдання в середовищі CFX-Mesh

- 6.5.1. Запускаємо **CFX-Mesh** із середовища **ANSYS Workbench**:



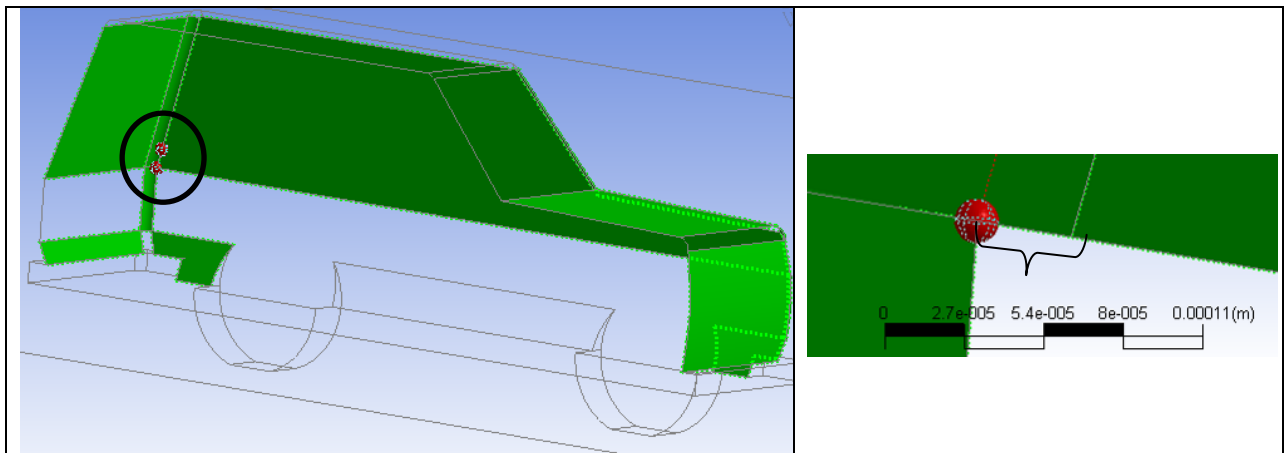
- 6.5.2. У діалозі, що з'явився, вказуємо *нейтральний* файл попередньо створеної геометрії **Avto_in_block.igs**:



6.5.3. Проведемо попереднє формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh:

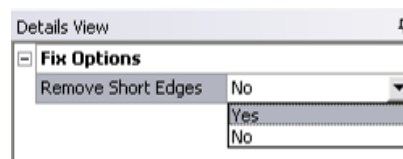


Програма повідомляє, що для заданих за замовченням параметрів побудування сітки неможливе та вказує помилки: **Problem: Surface mesh has small internal angles** з вказанням цих геометричних особливостей. Дійсно, бачимо погане зшиття поверхонь з допуском (tolerance) порядку $2 \cdot 10^{-5}$ м:

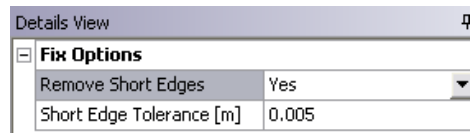


6.5.4. Проводити згущення геометрії для такої задачі немає сенсу. Віртуальна топологія також не надає можливості виправити ситуацію.

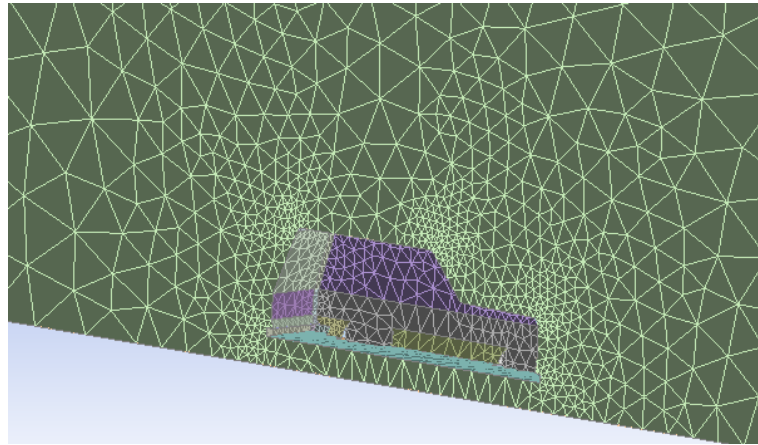
Для вирішення проблеми скористаємося можливістю ігнорування при побудові сітки дрібних геометричних деталей. Для цього в дереві проекту в позиції Geometry / Fix Options виставимо в вікні Detail Views параметр Remove Short Edges в позицію Yes:



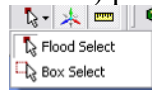
Вкажемо допуск для ремешінгу 5 мм:



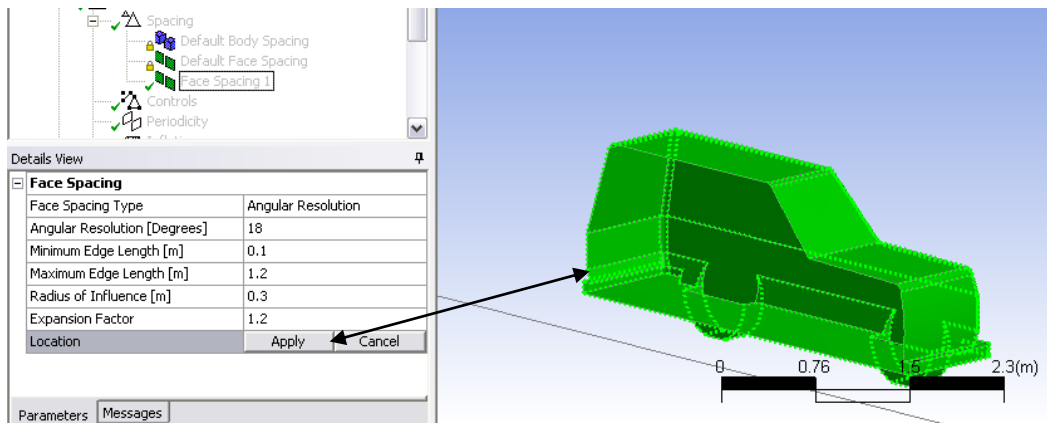
Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. За новим розбиттям помилок не виявлено:



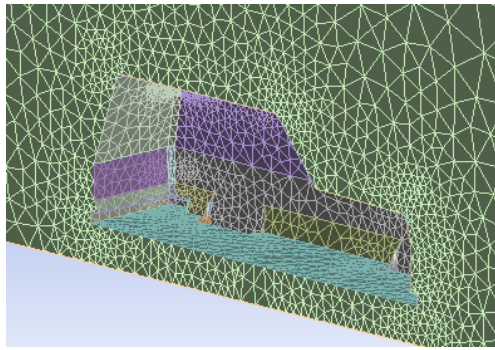
6.5.5. Даний пункт виконується в залежності від потужності наявної комп'ютерної техніки. Якість сітки, особливо під днищем автомобіля недостатня, тому проведемо згущення сітки біля поверхонь автомобіля. В дереві проєкту в позиції Mesh / Spacing зробимо вставку Insert (права кнопка миші) розмірності сітки біля поверхонь Face Spacing.



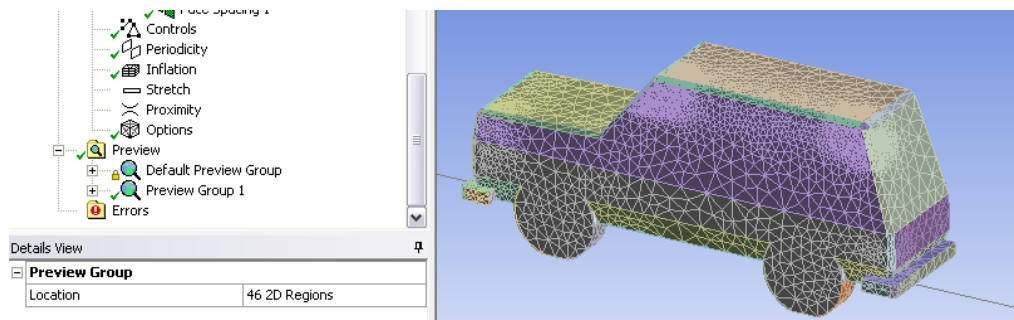
Виділимо за допомогою Box Select поверхні автомобіля, та натиснемо Apply. Мінімальний розмір сітки вкажемо 0,1 м. Інші позиції вкажемо як на малюнку нижче:



6.5.6. Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. За новим розбиттям помилок не виявлено, та сітка має згущення біля поверхонь автомобіля:

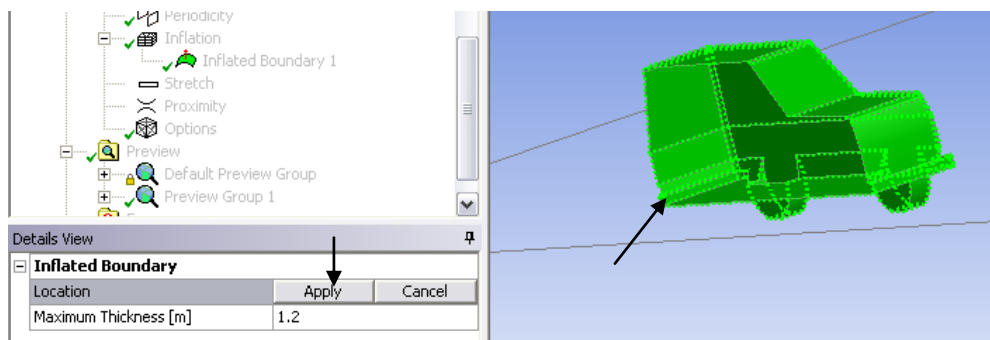


6.5.7. Зробимо нову Preview group в позиції дерева проєкту Preview, в яку включимо всі поверхні авто (виділимо їх за допомогою Box Select):

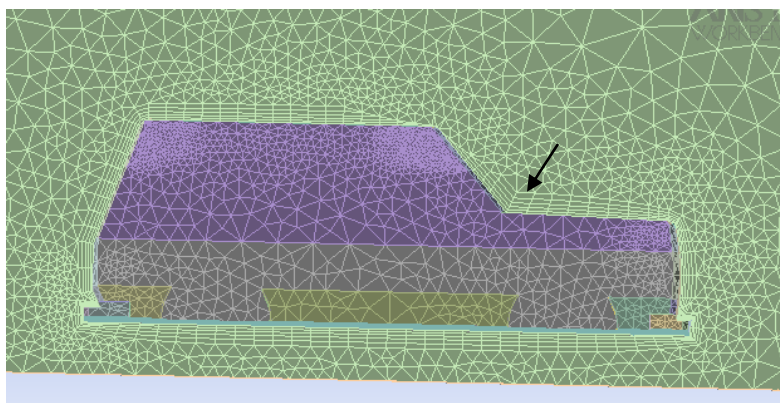


6.5.8. Проведемо вставку пограничного шару. Для цього в дереві проєкту зробимо вставку Insert в позиції Inflation -> Inflation Boundary. За допомогою способу вибору об'єктів Box Select

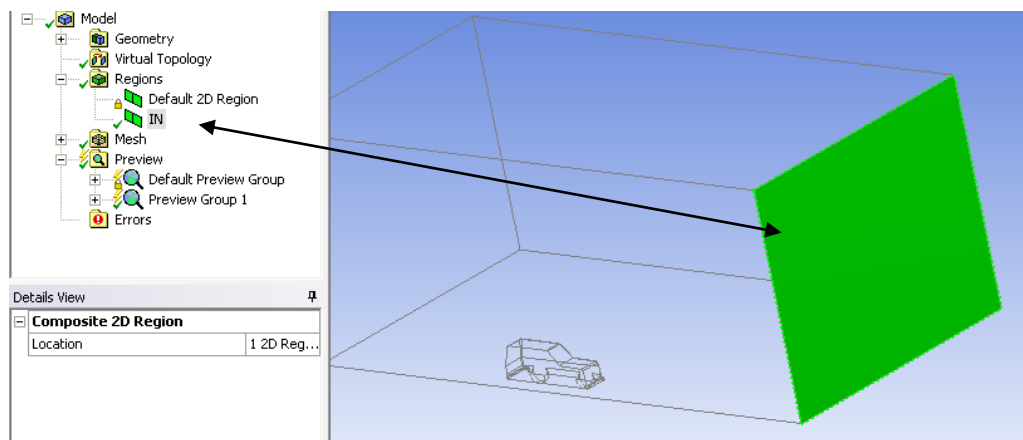
виділимо усі поверхні автомобілю:



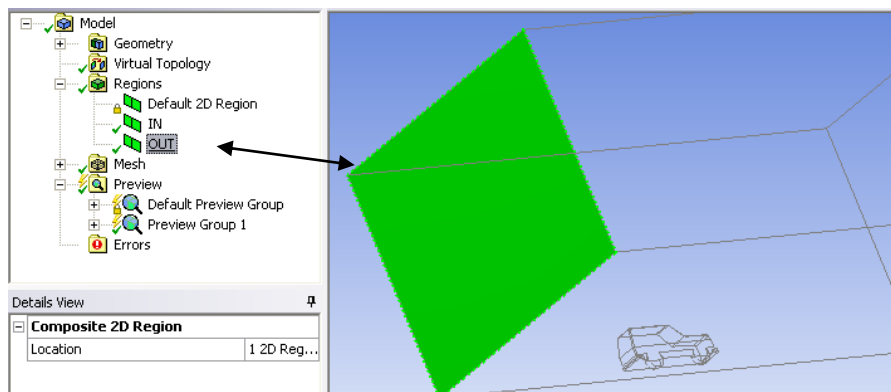
6.5.9. Проведемо нове формування поверхневої сітки з параметрами за замовченням — Generate the surface mesh. Бачимо на поверхнях наявність шарів призматичних комірок:



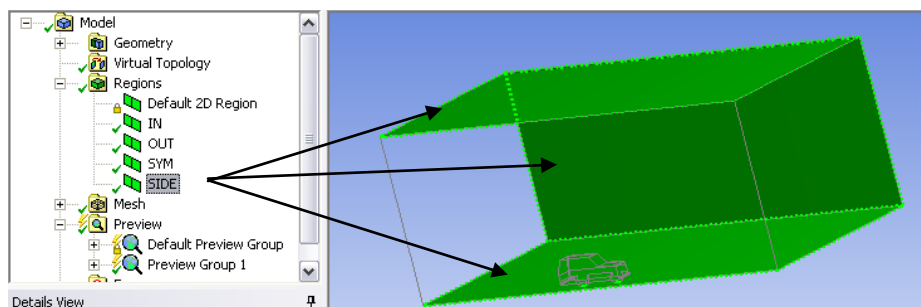
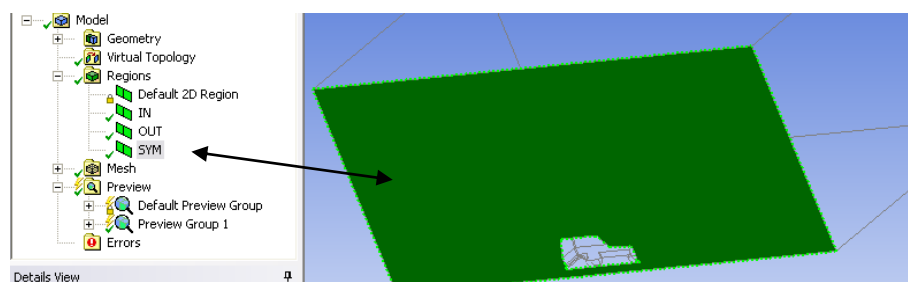
6.5.10. Надамо назви необхідним поверхням з дерева проєкту: Regions -> Insert -> Composite 2D Region, та вказуємо вхід (сторона набігання повітря) — IN (використовуємо Rename за правою кнопкою миші на імені, що з'явилося за замовчанням):

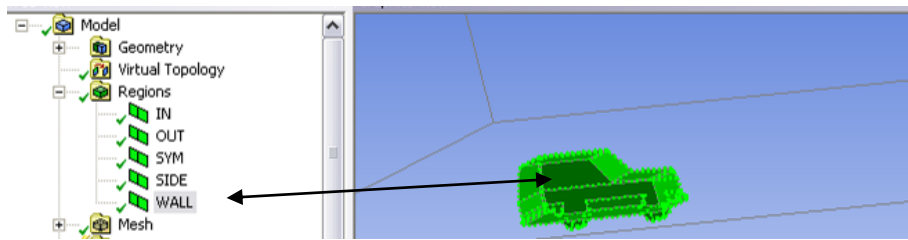


6.5.11. Аналогічно задаємо вихід:



Також задамо послідовно поверхню симетрії як SYM, верхню нижню та бокову поверхні об'єму як SIDE, та поверхні автомобілю як WALL:





6.5.12. Проводимо генерацію та збереження отриманої сітки:



Контрольні питання.

1. Які типи нейтральних файлів мають поширення і які основні відмінності між ними?
2. Які відмінності між поверхневою та об'ємною сіткою, і для яких задач вони застосовуються?
3. Що таке інфляція сітки в контексті генерації призматичних комірок?
4. Які основні переваги використання призматичних елементів у зоні поблизу стінки тіла (boundary layer)?
5. Що таке коефіцієнт росту інфляційного шару, і як він визначає зміну товщини між шарами?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Аеродинаміка автомобіля в CFD-системах

7.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок роботи в CFD-системах.
Задача роботи — робота в препроцесорі, розрахунки, робота в постпроцесорі.

7.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

7.2.1. Область застосування сучасних CFD-систем

На сучасному етапі розвитку науки та техніки обчислювальний експеримент посідає важливе місце у вивченні складних фізичних процесів, зокрема в галузях аеродинаміки, гідродинаміки, тепло- і масообміну, а також процесів горіння. Чисельне моделювання дозволяє не лише глибше зрозуміти фізичну природу явищ, що спостерігаються в експериментах, але й у багатьох випадках замінити дорогі натурні дослідження на більш економічний комп'ютерний розрахунок. У деяких випадках саме комп'ютерне моделювання є єдино можливим засобом дослідження.

З огляду на постійне зростання потужності обчислювальних засобів, можна очікувати подальше збільшення ролі комп'ютерних експериментів у техніці. Розвиток чисельних методів і прикладних програм для вирішення складних науково-технічних завдань є предметом роботи великої кількості дослідників. Через різноманітність таких завдань часто виникає дублювання зусиль: навіть при використанні однакових методів різні фахівці змушені самостійно розробляти повні програмні рішення. Це призводить часто до створення програм одноразового (несерійного) застосування, на створення й налагодження яких витрачаються значні ресурси. Ці обставини зумовлюють необхідність переходу до створення програмних пакетів, орієнтованих на розв'язання цілих класів задач. Нині активно розробляються і застосовуються програмні комплекси, які охоплюють обчислювальну гідродинаміку, теплообмін, міцність матеріалів та електродинаміку.

Серед сучасних інструментів, що використовуються в інженерних розрахунках, варто згадати такі програмні продукти, як **CFX**, **FLUENT**, **STAR-CD**, **LS-DYNA**, **ANSYS**, **ABAQUS**, **COMSOL Multiphysics**, **MSC/NASTRAN**, **MSC/MARC**, **MAGMASOFT**. Історично обчислювальна гідро- та газодинаміка розвивалася у межах аерокосмічної галузі, зокрема для моделювання камер згоряння ракетних двигунів та процесів обтікання об'єктів при надзвукових швидкостях. Сьогодні ж сфера застосування цих методів значно розширилася і охоплює широкий спектр завдань у цивільній інженерії, енергетиці, автомобілебудуванні, екології та інших галузях.

Обчислювальна гідро- та газодинаміка (ОГД), або CFD, спочатку розвивалася як інструмент для вирішення складних завдань у сфері аерокосмічної техніки, таких як моделювання процесів згоряння в ракетних двигунах чи аналіз обтікання надзвукових літальних апаратів і бойових частин. З часом можливості ОГД вийшли за межі лише військових або космічних застосувань, і сьогодні вона широко використовується у цивільній інженерії та промисловості. Методи CFD активно застосовуються у комерційних програмних продуктах для моделювання різноманітних фізичних процесів, пов'язаних із рухом рідин і газів. Нижче наведений короткий список задач, що розв'язуються методами ОГД із використанням комерційних програм.

Автомобільна промисловість:

- визначення коефіцієнтів опору корпусу автомобіля повітряному потоку;
- вентиляція підкапотного простору й салону;

- моделювання горіння палива в камері згоряння.

Аерокосмічна промисловість:

- моделювання обтікання літаків і ракет;
- вентиляція та пожежна безпека салонів літаків;
- моделювання фізико-хімічних процесів у турбореактивних двигунах і в камерах згоряння ракет.

Технологічні процеси виробництва:

- моделювання лиття металів і пластмас у форму;
- моделювання теплових і/або фізико-хімічних процесів у хімічних і біологічних апаратах.

Будівництво:

- розрахунки вітрових навантажень на будинки й спорудження;
- вентиляція та пожежна безпека будинків;
- визначення опорів повітроводів і водопостачальних пристроїв.

Енергетика:

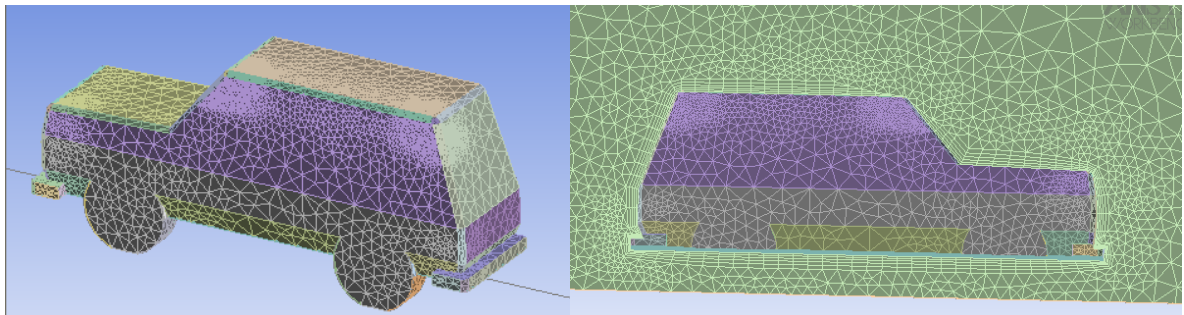
- розрахунки пальників для спалювання палива в котлах ТЕЦ;
- розрахунки викидів оксидів азоту казанами ТЕЦ;
- визначення опорів газоходів.

Екологія й надзвичайні ситуації:

- моделювання поширення забруднень у водо-повітряних басейнах;
- моделювання поширення пожеж у лісах і містах.

7.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступної CFD-системи провести аеродинамічний розрахунок автомобілю, сітка для якого була зроблена в лабораторній роботі № 6:



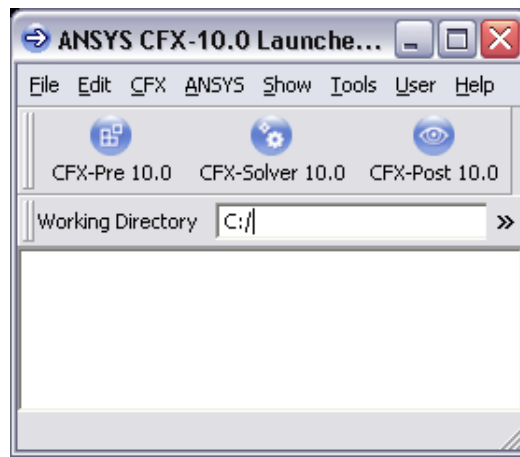
Розрахувати лобовий опір автомобілю, визначити долю опору форми та опору тертя в загальному опорі, та розрахувати коефіцієнт аеродинамічного опору C_x .

7.4. ХІД РОБОТИ

- 7.4.1. Імпортувати в CFD-систему сітку попередньо створеного простору;
- 7.4.2. Задати вхідні параметри (параметри повітря та граничні умови) в препроцесорі системи та направити отримані дані до солверу;
- 7.4.3. Провести розрахунки;
- 7.4.4. Провести аналіз виконаних розрахунків в постпроцесорі.

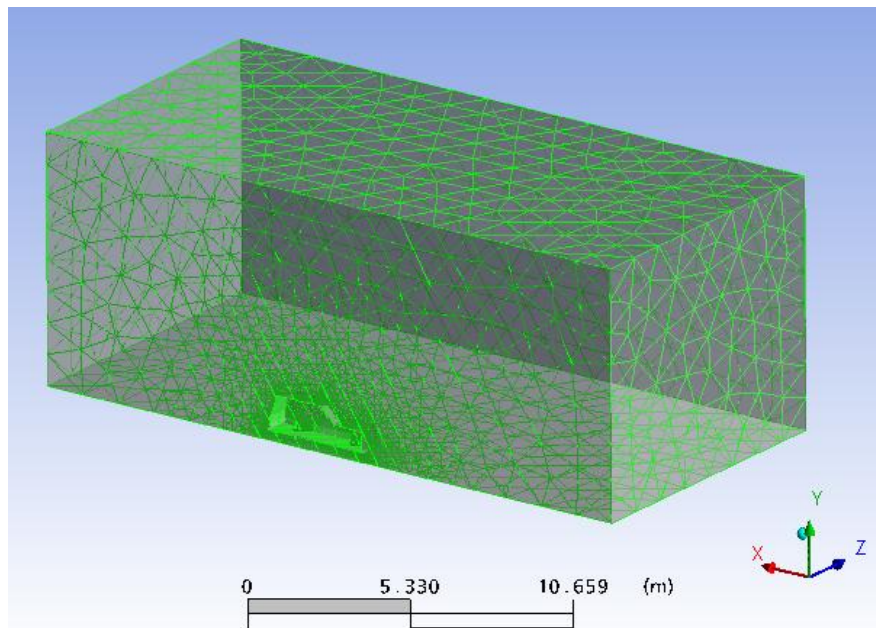
7.5. Приклад виконання завдання в середовищі CFX (компонент ANSYS Student)

- 7.5.1. Запускаємо програму **CFX**. Вхідний модуль системи являє собою вікно з можливістю входу до препроцесору, солверу, та постпроцесору:

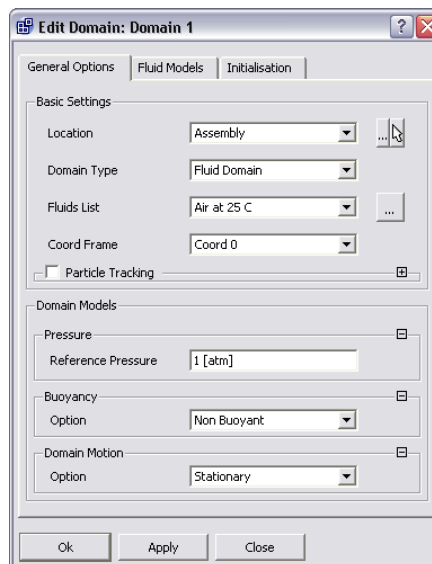


7.5.2. Входимо до препроцесору системи та створюємо нову симуляцію New Simulation. Система потребує створення файлу сесії, для цього вкажемо папку Work_Directory та збережемо сесію як файл з довільною назвою, наприклад Avto_1 (в назвах файлу та папки уникайте кирилиці).

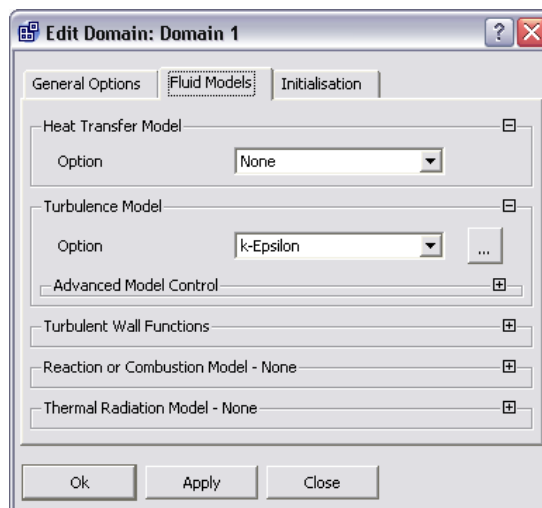
7.5.3. Імпортуємо попередньо створений файл сітки (лабораторна робота №6): Головне Меню / Import Mesh. Імпортована сітка має наступний вигляд:



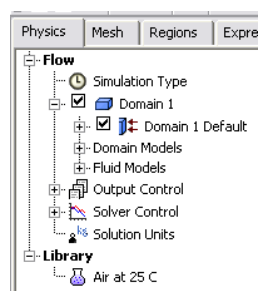
7.5.4. Створимо новий розрахунковий домен Головне Меню / Create / Flow Object/ Domain, у вікні, що з'явилося, в закладці General Options вказуємо параметри задачі як показано нижче:



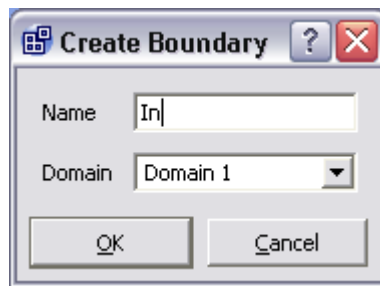
У закладці Fluid Models залишаємо параметри за замовчанням:



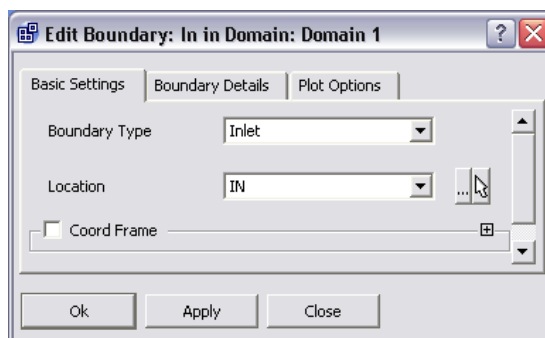
Створений домен відображується в дереві проєкту:



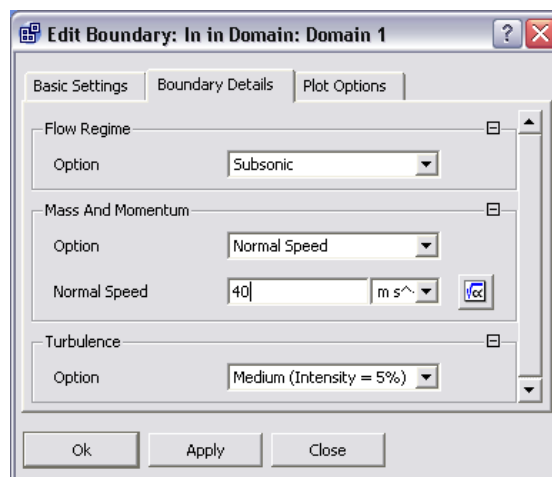
7.5.5. Задамо граничні умови на вході в область розрахунку: Головне меню/Create/Boundary_Conditions, вказуємо назву нової граничної умови:



У вікні, що з'явиться, в закладці Basic Setting вибираємо Тип граничної умови — Inlet, та область, що відповідає за цю умову — IN (назву областям присвоєно в попередній лабораторній роботі):

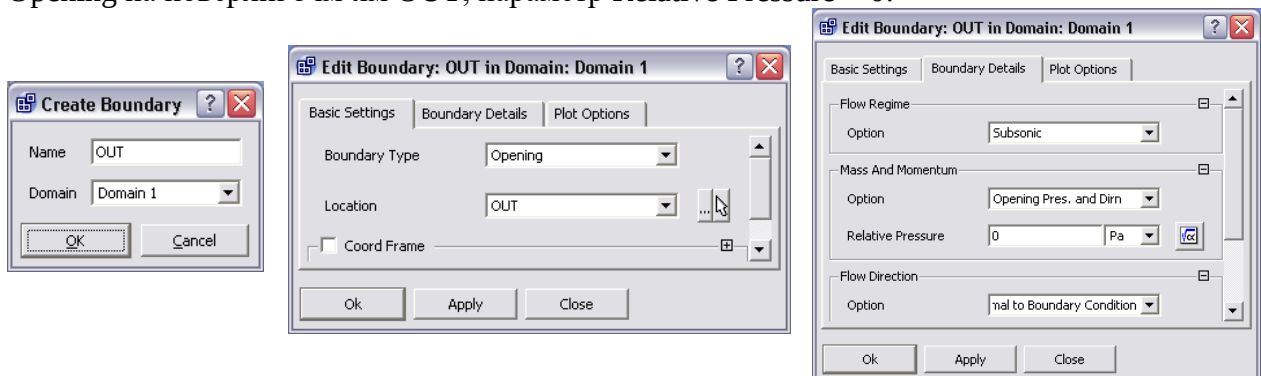


В закладці Boundary Details вказуємо швидкість набігаючого потоку:

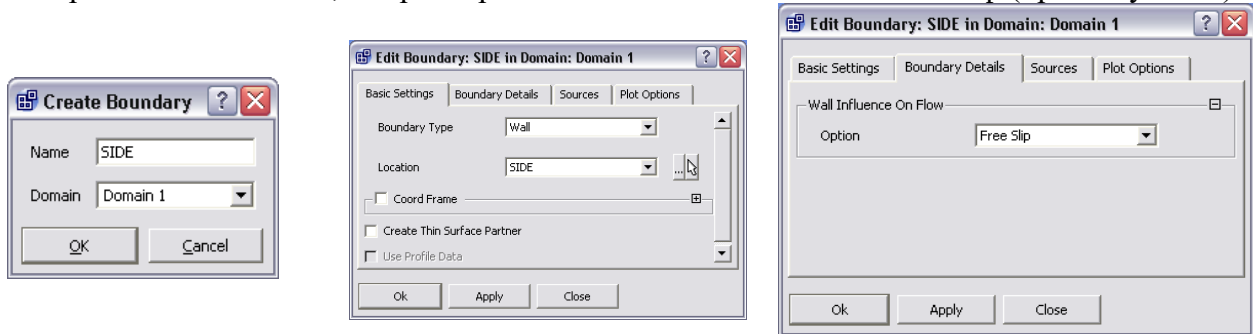


Натискаємо Ок.

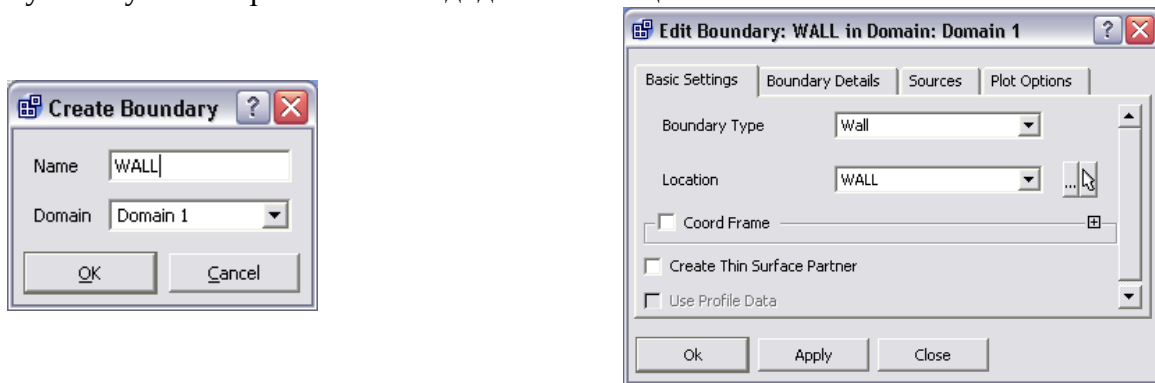
7.5.6. Аналогічним чином задаємо нову граничну умову з ім'ям OUT, типом Opening на поверхні з ім'ям OUT, параметр Relative Pressure = 0:



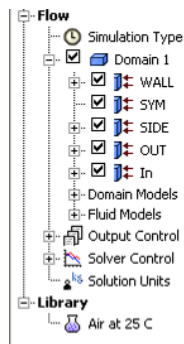
7.5.7. Аналогічно створюємо граничні умови з ім'ям SIDE, типом WALL на поверхнях з ім'ям SIDE, з параметром Wall Influence On Flow = Free Slip (проковзування):



7.5.8. Задаємо таким же чином граничну умову симетрії з ім'ям SYM, типом Symmetry на поверхні SYM без додаткових опцій:



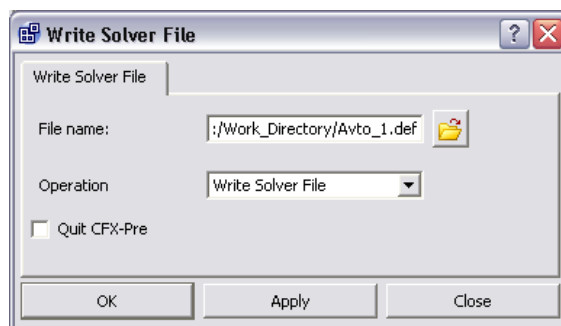
Таким чином в дереві проєкту відобразяться домен з відповідними граничними умовами:



7.5.9. Проведемо збереження отриманого файлу препроцесінгу в папку проєкту:

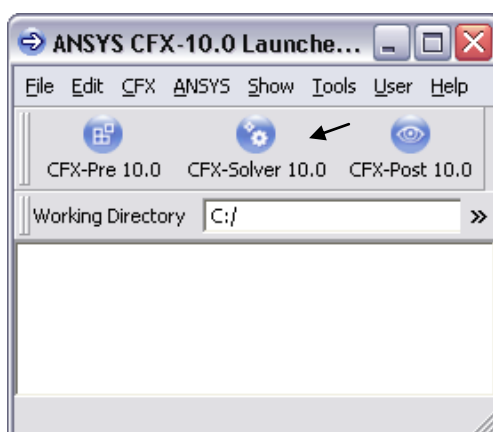


У вікні, що з'явилося, вказуємо папку та надаємо ім'я файлу, що зберігається, в якості операції вказуємо Write Solver File:

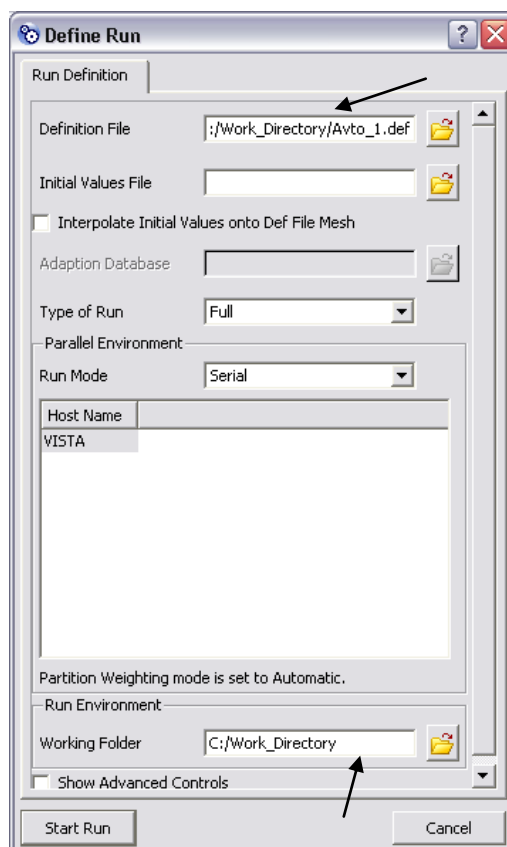


Закінчуємо роботу в CFX-Pre.

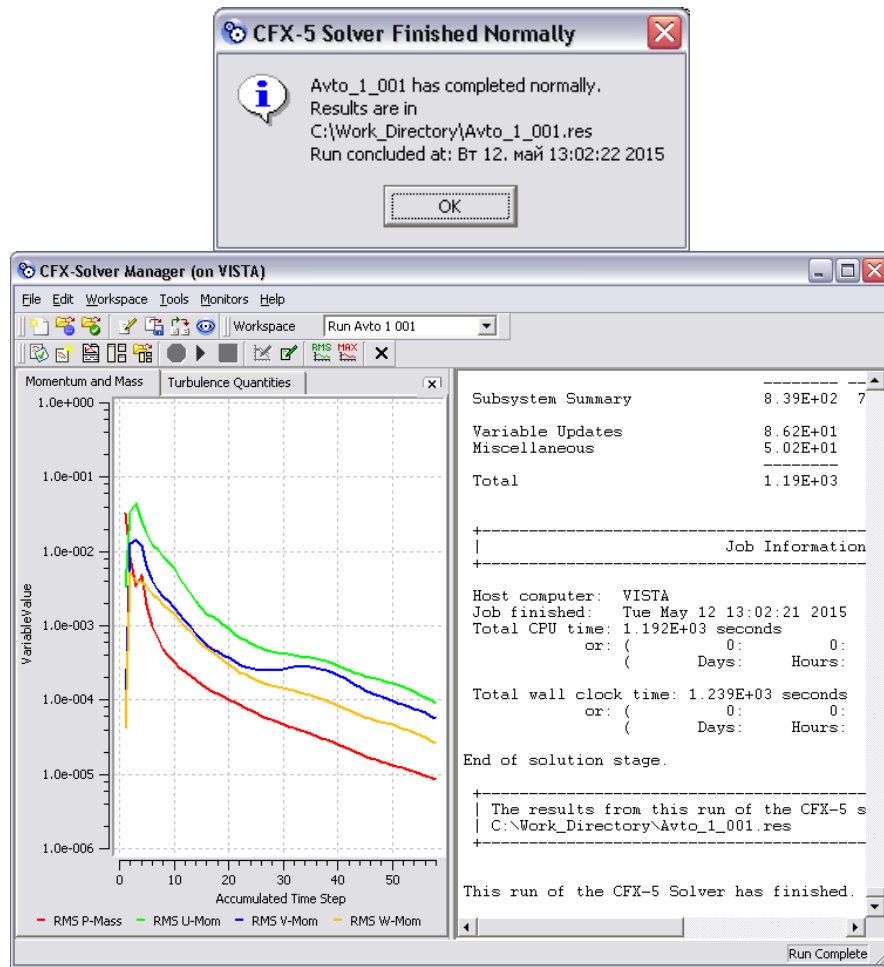
7.5.10. Входимо до солверу системи:



У вікні, що з'явилося, створюємо нову сесію Головне Меню/ File/ Define Run. В наступному вікні вказуємо файл, отриманий в препроцесорі, та вказуємо робочу директорію:

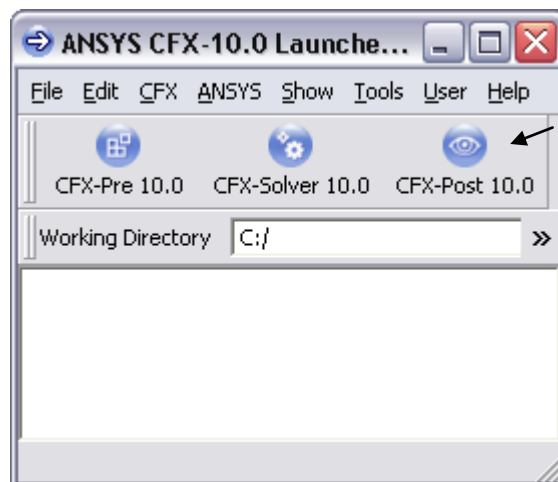


Починаємо розрахунок натискуючи Start Run.
Очікуємо закінчення розрахунків:



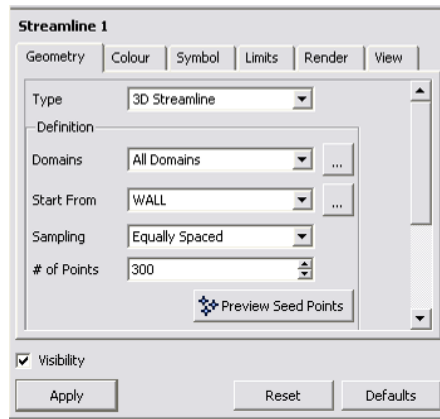
Файл результатів згенерований автоматично у робочій директорії як Avto_1_001.res. Виходимо з солверу.

7.5.11. Запускаємо постпроцесор системи:

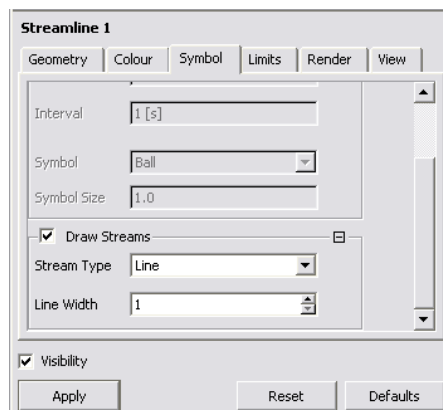


Завантажуємо результати Головне Меню/ File/ Load Results та вказуємо отриманий файл результатів Avto_1_001.res.

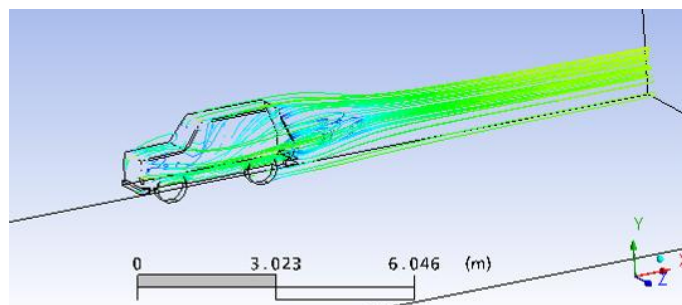
7.5.12. Створимо лінії потоку повітря, що обтікає автомобіль: Головне меню / Create/ Streamline, натискуємо ОК та вказуємо поверхні старту ліній потоку, а саме WALL, вказуємо їх кількість — 300:



В закладці Symbol змінимо товщину ліній на 1:

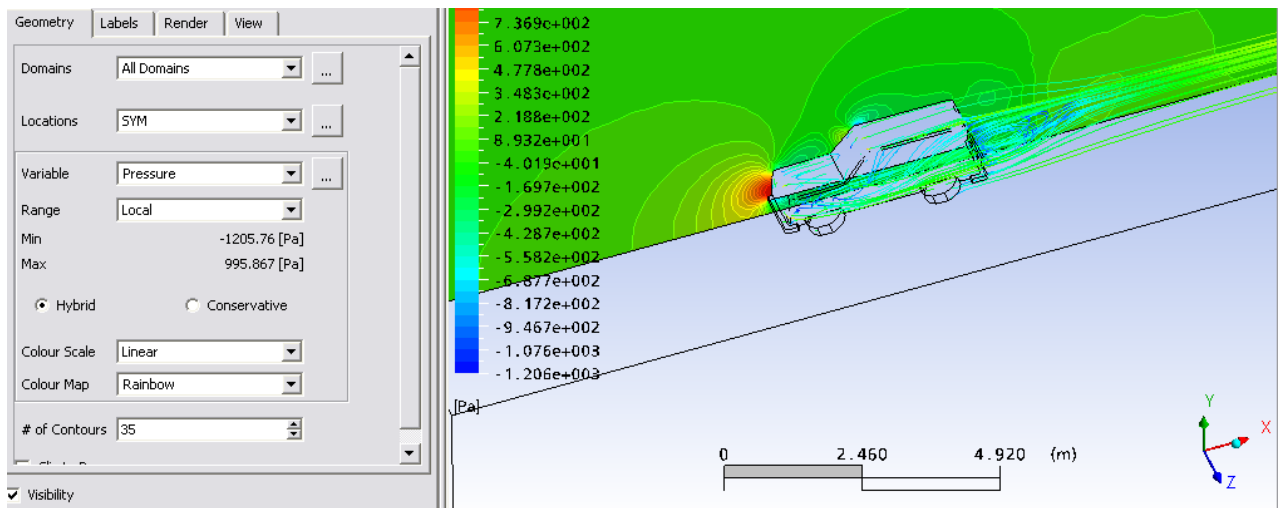


Натиснемо Apply:



Бачимо наявність крупногабаритних вихорів позаду авто, які створюють розрідження та значний лобовий опір як наслідок.

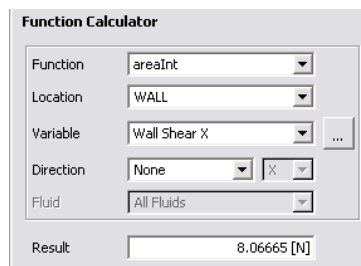
7.5.13. Розглянемо розподіл тисків на поверхні симетрії Головне меню / Create/ Contour, натиснемо ОК. В позиції Location виберемо SYM, в позиції Range виберемо Local, натиснемо Apply:



7.5.14. Розрахуємо лобовий опір автомобілю: Головне меню / Tools / Function Calculator.

В якості функції виберемо force, в позиції Location виберемо WALL, direction залишимо як X, та натиснемо Calculate. Отримане значення сили необхідно подвоїти у зв'язку з розрахунками тільки симетричної половини задачі. Остаточне значення $P=1200$ Н. Це значення завищене у зв'язку з недостатньою якістю сітки. Для більш детальної сітки значення буде уточнюватися.

7.5.15. Розрахуємо опір тертя для даної задачі. В якості функції виберемо AreaInt, в позиції Location виберемо WALL, в якості змінної Variable вкажемо Wall Shear X (дотичні напруги уздовж X). Отримаємо результат:



Вказаний результат також повинен бути подвоєний.

7.5.16. Розраховуємо потужність, що витрачається двигуном на подолання опору за формулою $N = P \cdot v$, у відповідності з отриманими даними:

$$N = 1200 \cdot 40 = 48 \text{ кВт},$$

або 65 к.с.

Контрольні питання.

1. Які елементи геометрії автомобіля найбільше впливають на формування повітряного потоку?
2. Які граничні умови найчастіше задаються при CFD-аналізі зовнішньої аеродинаміки автомобіля?
3. Що таке турбулентність і які моделі турбулентності зазвичай використовуються для моделювання повітряного потоку навколо автомобіля?
4. Як визначаються та аналізуються зони відриву потоку й вихрових структур позаду автомобіля?
5. Як використовується CFD для оптимізації аеродинамічних компонентів, таких як антикрила, дефлектори або дифузори?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Нестаціонарні задачі в CFD-системах на прикладі розрахунку газодинаміки в дифузорі та впускному колекторі

8.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — практичне відпрацювання навичок роботи в CFD-системах.
Задача роботи — робота в препроцесорі, розрахунки, робота в постпроцесорі.

8.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

8.2.1. Нестаціонарні задачі в САПР. Загальні відомості

Нестаціонарні процеси є широким класом задач, що досліджуються в САПР. До них відносяться, наприклад, задачі динаміки конструкцій, нестаціонарні задачі гідро- й газодинаміки, нестаціонарні тепло- та масообмінні процеси. Основною властивістю вказаних задач є залежність параметрів процесу від часу, що враховується в диференціальних рівняннях процесу наявністю похідної за часом. У зв'язку з цим, для повного вирішення такої задачі, її необхідно доповнити не тільки граничними умовами, але й початковими, що характеризують стан системи в початковий момент часу. У даній роботі як приклад моделювання нестаціонарних задач розглядається задача несталого руху газу в дифузорі та розподільній камері перед пропускним колектором автомобільного двигуна.

8.2.2. Принцип роботи

Повітря, надходячи з навколишнього середовища під дією розрідження створюваного поршнем двигуна при такті "усмоктування", частково оминає малий дифузор і проходить до великого дифузора. Частина повітря проходить через малий дифузор (його зменшений перетин), прискорюється, й у зоні виходу з каналу топливно-повітряна емульсія дробиться і розпорошується до більш однорідного, дрібнодисперсного стану.

Зустрічаючись на виході з малого дифузора з потоком додаткового повітря, суміш повторно збіднюється й розпорошується. Таким чином виходить співвідношення палива й повітря в межах 1:14.7. Така суміш вважається "оптимальною" і надходить у циліндри двигуна.

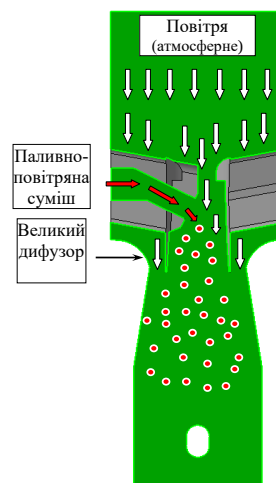
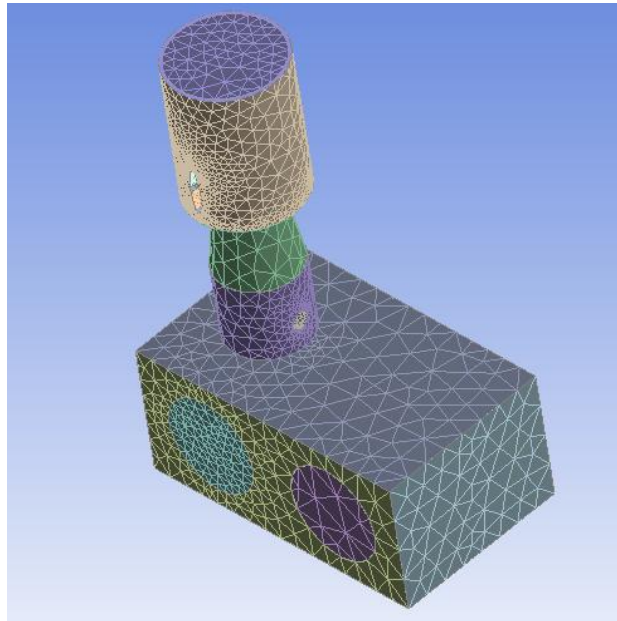


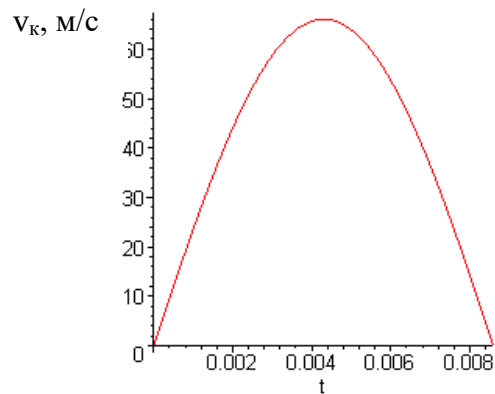
Рис. 8.1. Схема розпилення паливо-повітряної суміші.

8.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступної CFD-системи провести газодинамічний розрахунок дифузору, сітка якого була попередньо зроблена в лабораторній роботі № 5 (з врахуванням розподільчої камери):



Цикл впуску паливно-повітряної суміші для 3500 об/хв. задати у відповідності з наступною циклограмою:



де v_k — швидкість на вході у впускний канал колектору, пікове значення 66 м/с, що відповідає розрахункам за кількістю усмоктуваного повітря на півоборота колінчатого валу двигуна для діаметру впускного каналу колектору 33 мм, $T=0,0086$ с — період впуску. Піковий опір інжекційного каналу задати на рівні -10 кПа.

Розрахувати розрідження в колекторній камері, побудувати лінії току, що відповідають руху розпиленого палива у гомогенному наближенні, розрахувати потужність, що витрачається на всмоктування, порівняти з потужністю, що витрачається на аеродинамічний опір з лабораторної роботи №7.

8.4. ХІД РОБОТИ

8.4.1. Імпортувати в CFD-систему сітку попередньо створеного простору;

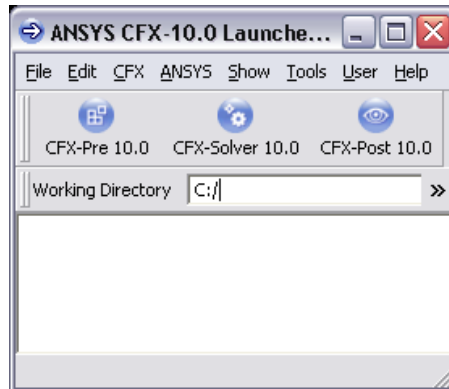
8.4.2. Задати входні параметри (параметри повітря, граничні та початкові умови) в препроцесорі системи та направити отримані дані до солверу;

8.4.3. Провести розрахунки;

8.4.4. Провести аналіз виконаних розрахунків в постпроцесорі.

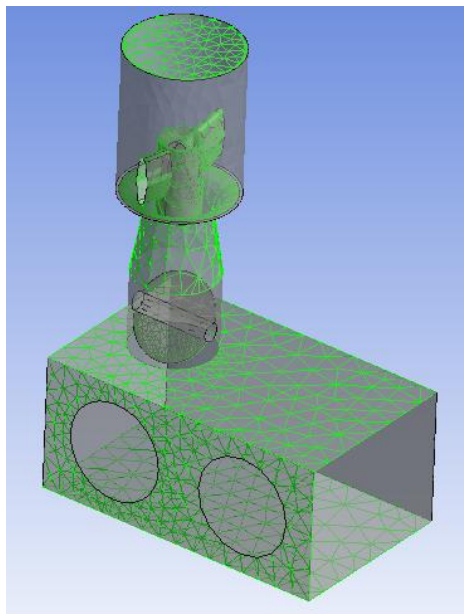
8.5. Приклад виконання завдання в середовищі CFX (ANSYS Student)

8.5.1. Запускаємо програму **CFX**. Вхідний модуль системи являє собою вікно з можливістю входу до препроцесору, солверу, та постпроцесору:

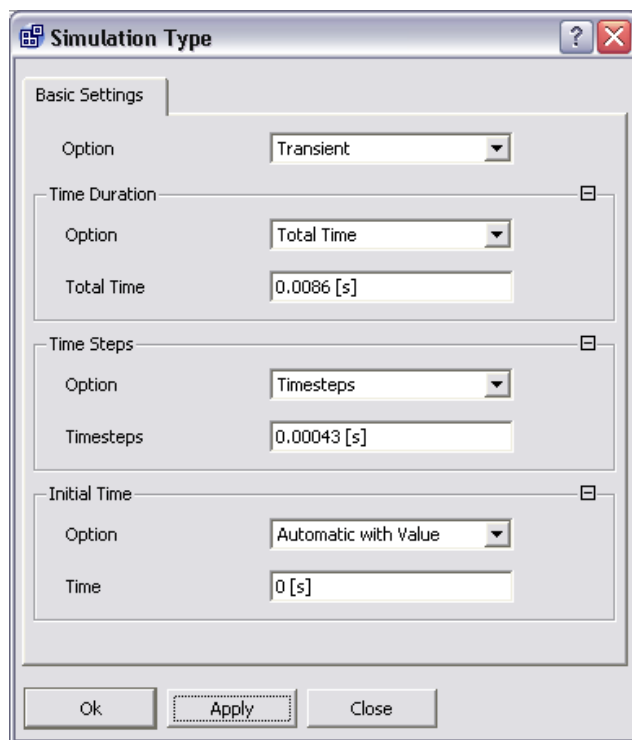


8.5.2. Входимо до препроцесору системи та створюємо нову симуляцію New Simulation. Система потребує створення файлу сесії, для цього вкажемо папку Work_Directory та збережемо сесію як файл з довільною назвою, наприклад Avto_1 (в назвах файлу та папки уникайте кирилиці).

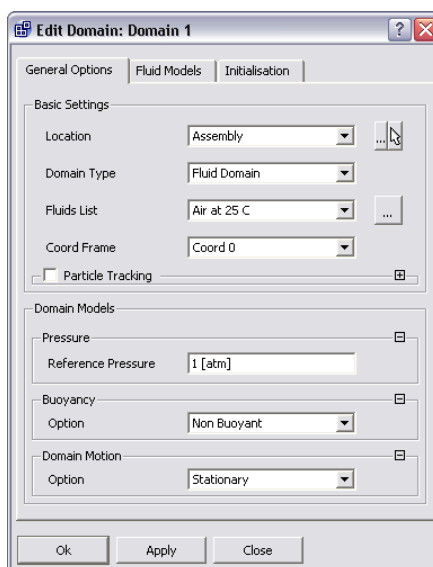
8.5.3. Імпортуємо попередньо створений файл сітки (файл Diff (3500).gtm, лабораторна робота №5): Головне Меню / Import Mesh. Імпортована сітка має наступний вигляд:



8.5.4. Вкажемо параметри нестационарного розрахунку: Головне Меню / Create / Flow Object / Simulation Type як вказано нижче:

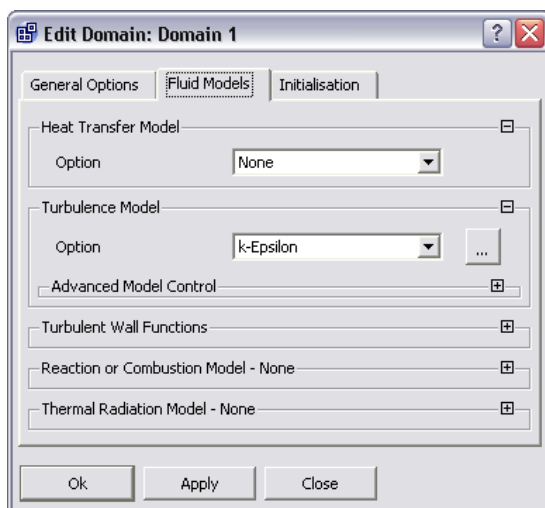


8.5.5. Створимо новий розрахунковий домен Головне Меню / Create / Flow Object/ Domain, у вікні, що з'явилося, в закладці General Options вказуємо параметри задачі як показано нижче:

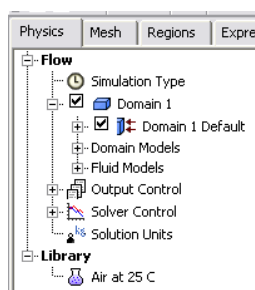


Примітка: завдання константних параметрів повітря для вказаного розрахунку є досить грубим наближенням, оскільки швидкості в каналах можуть наблизитися до швидкості звуку, більш правильний вибір — Air Ideal Gas — задається виходячи з можливостей наявних потужностей комп'ютерної техніки. Також в лабораторній роботі розраховується динаміка тільки однієї фази, а саме — повітря, вважається, що динаміка частинок розпиленого палива, концентрація якого у розрахунку на об'ємні ділі дуже низька, не значно впливає на остаточне поле швидкостей.

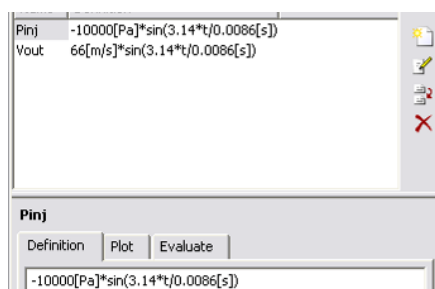
У закладці Fluid Models залишаємо параметри за замовчанням:



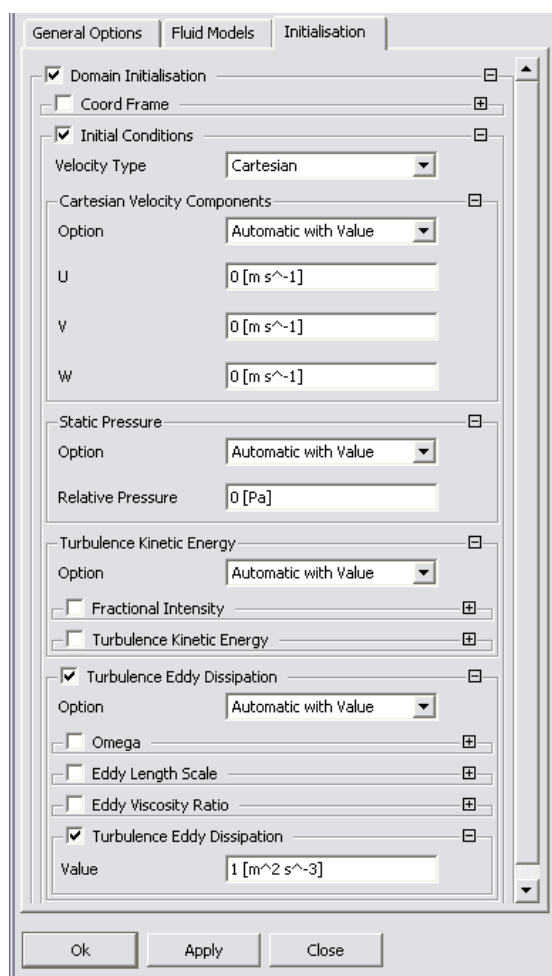
Створений домен відображується в дереві проєкту:



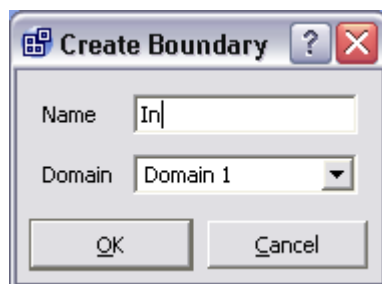
8.5.6. Задамо попередні змінні, що будуть характеризувати впуск повітря та опір інжекційного каналу. Для цього в закладці Expressions (або Головне Меню / Library Object / Expression) створимо нову змінну New з ім'ям Vout та у вікні Definition задамо її значення $66[\text{m/s}] \cdot \sin(3.14 \cdot t / 0.0086[\text{s}])$. Аналогічно створимо змінну Pinj зі значенням $-10000[\text{Pa}] \cdot \sin(3.14 \cdot t / 0.0086[\text{s}])$:



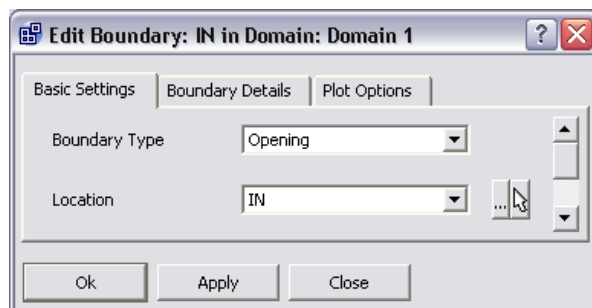
8.5.7. Задамо початкові умови визвавши Domain з дерева проєкту в закладці Initialization як показано нижче:



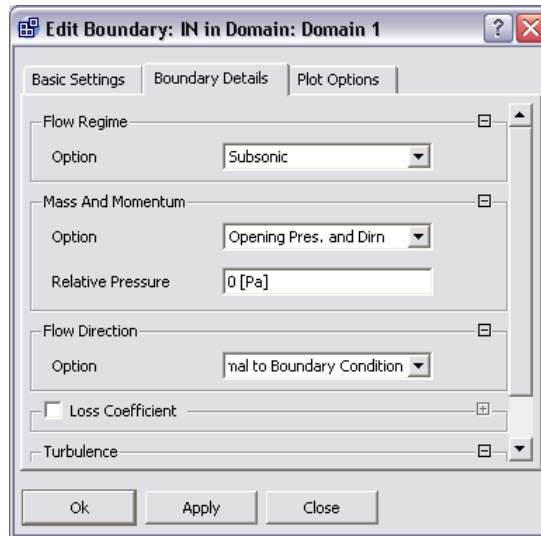
8.5.8. Задамо граничні умови на вході в область розрахунку: Головне меню/Create/Boundary_Conditions, вказуємо назву нової граничної умови:



У вікні, що з'явиться, в закладці Basic Setting вибираємо Тип граничної умови — Opening, та область, що відповідає за цю умову — IN (назву областям присвоєно в попередній лабораторній роботі):

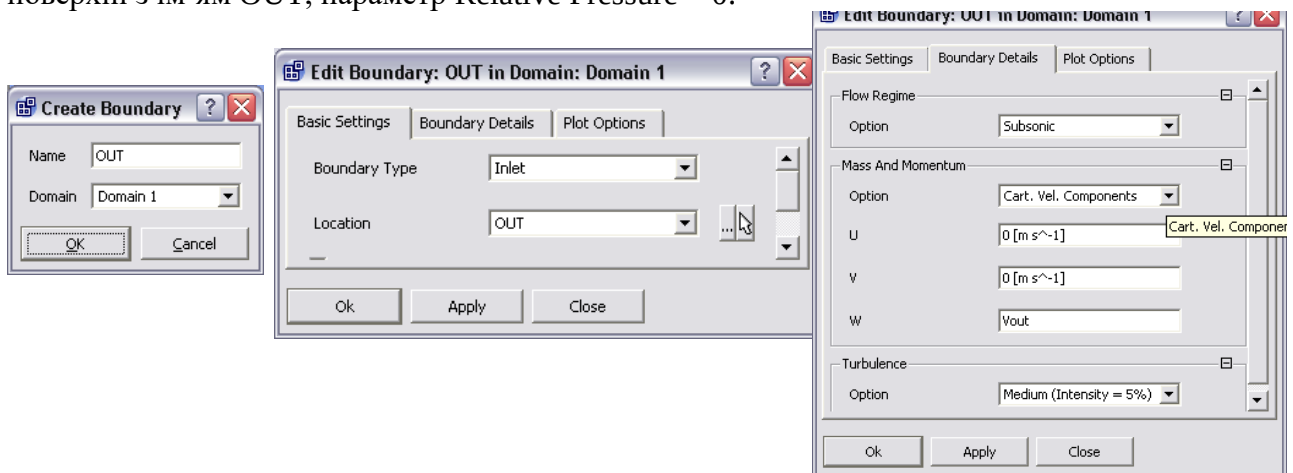


В закладці Boundary Details вказуємо тиск на вході відносно атмосферного — 0 Па:

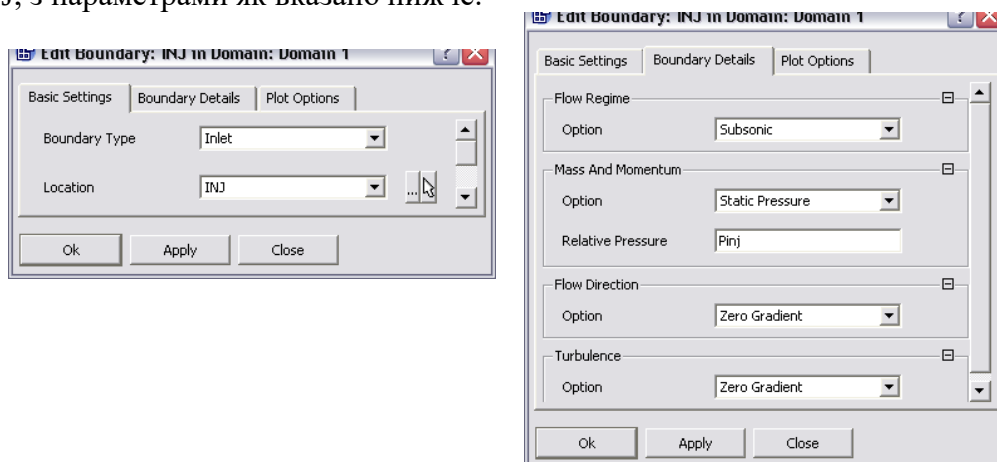


Натискуємо Ок.

8.5.9. Аналогічним чином задаємо нову граничну умову з ім'ям OUT, типом Inlet на поверхні з ім'ям OUT, параметр Relative Pressure = 0:

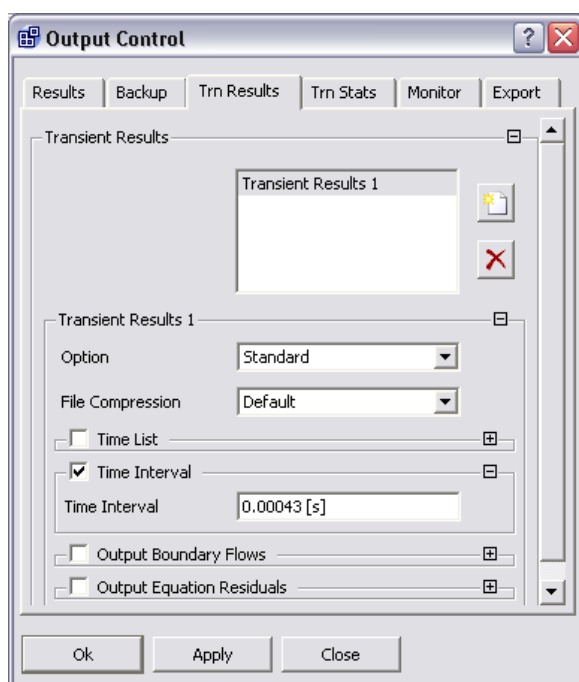


8.5.10. Аналогічно створюємо граничні умови з ім'ям INJ, типом Inlet на поверхнях з ім'ям INJ, з параметрами як вказано нижче:

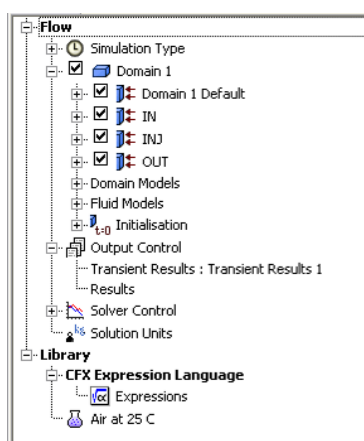


8.5.11. Іншим поверхням CFX автоматично присвоїть значення стінки.

8.5.12. Вкажемо частоту збереження файлів проміжних результатів Головне меню / Create / Flow Object / Output Control, та в закладці Trn Result створимо новий запис проміжних розрахунків:



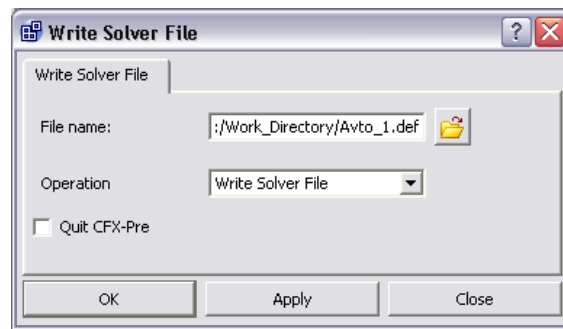
Таким чином в дереві проєкту відобразяться домен з відповідними граничними та початковими умовами:



8.5.13. Проведемо збереження отриманого файлу препроцесінгу в папку проєкту:

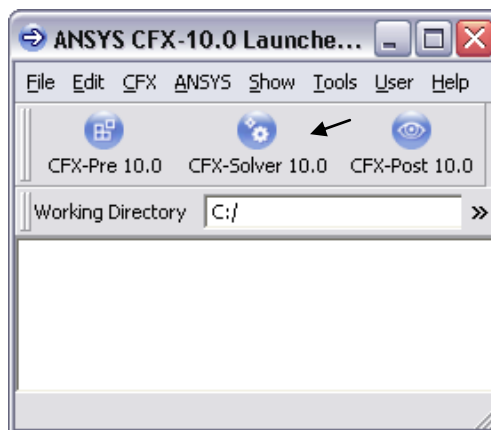


У вікні, що з'явилося, вказуємо папку та надаємо ім'я файлу, що зберігається, в якості операції вказуємо Write Solver File:

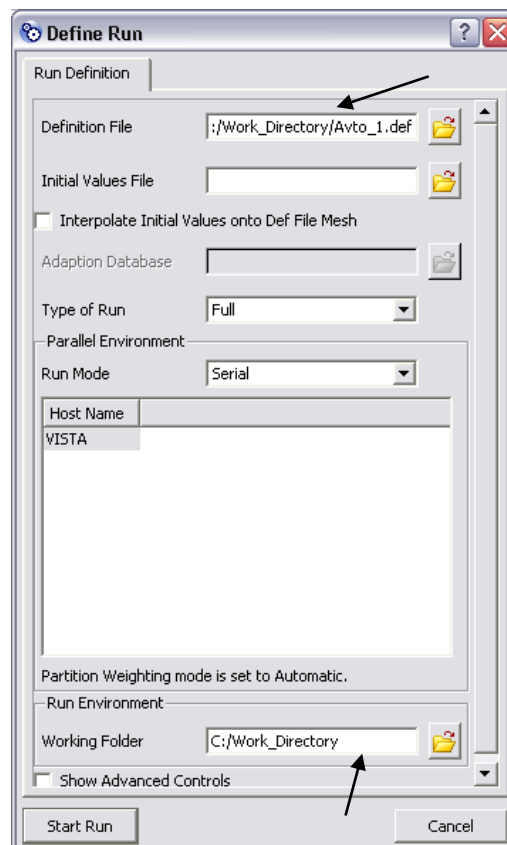


Закінчуємо роботу в CFX-Pre.

8.5.14. Входимо до солверу системи:



У вікні, що з'явилося, створюємо нову сесію Головне Меню/ File/ Define Run. В наступному вікні вказуємо файл, отриманий в препроцесорі, та вказуємо робочу директорію:

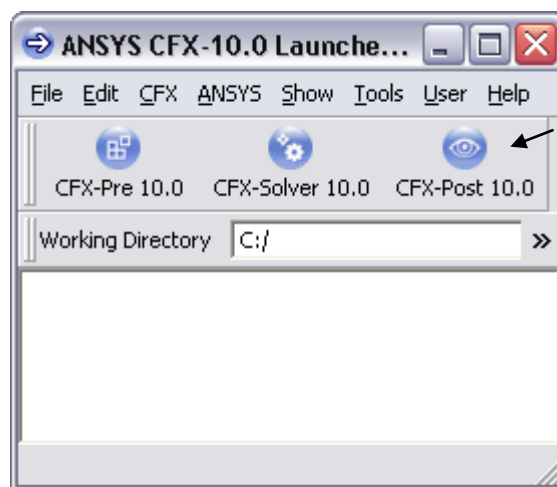


Починаємо розрахунок натискуючи Start Run.
Очікуємо закінчення розрахунків:



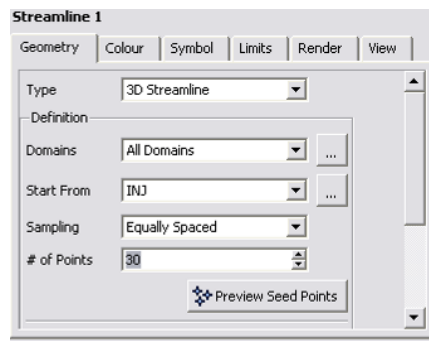
Файл результатів згенерований автоматично у робочій директорії як Avto_1_001.res. Виходимо з солверу.

8.5.15. Запускаємо постпроцесор системи:

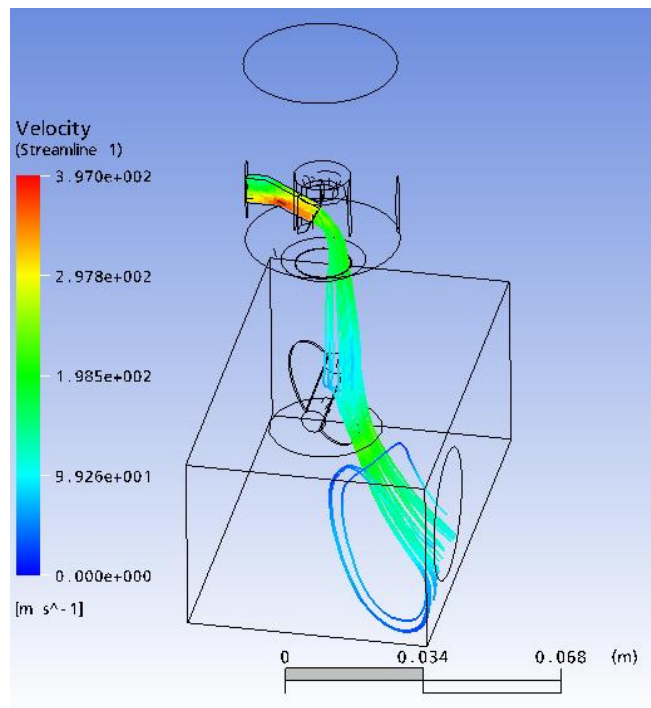


Завантажуємо результати Головне Меню/ File/ Load Results та вказуємо отриманий файл результатів Avto_1_001.res.

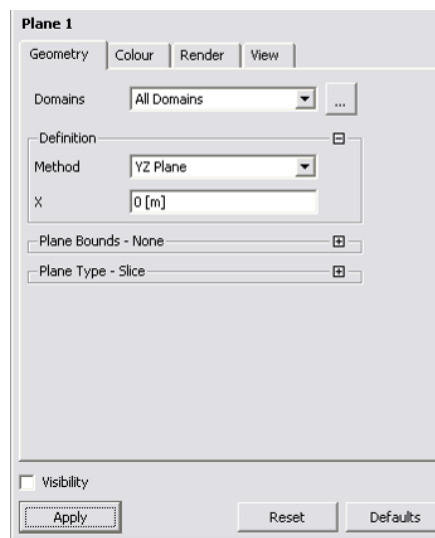
8.5.16. Створимо лінії потоку повітря, що несуть в собі розпилене паливо для моменту часу $T/2$. Для цього виставимо спочатку на цей час кадр розрахунку: Головне Меню / Tools / TimestepSelector та у вікні, що з'явилося, активізуємо строку за номером 10. Далі безпосередньо задаємо лінії току: Головне меню / Create/ Streamline, натискуємо OK та вказуємо поверхні старту ліній потоку, а саме INJ, вказуємо їх кількість — 30:



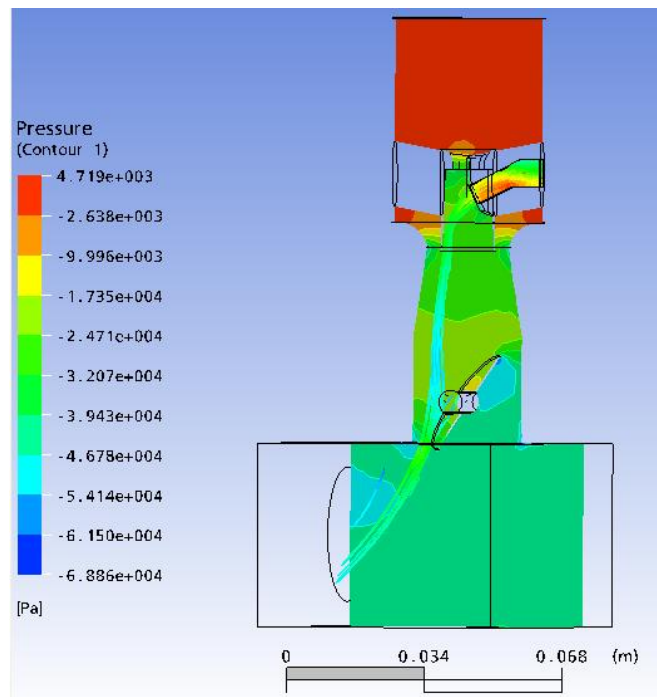
Натиснемо Apply:



8.5.17. Розглянемо розподіл тисків на поверхні, що перерізає дифузор. Створимо вказану поверхню: Головне Меню / Create / Location / Plane



- знімаємо прапорець з Visibility. Будемо розподіл тиску Головне меню / Create/ Contour, натиснемо OK. В позиції Location виберемо Plane 1, в позиції Variable ставимо Pressure, в позиції Range виберемо Local, натиснемо Apply:



8.5.18. Розраховуємо значення тиску на вході в колекторний патрубок: Головне меню / Tools / Function Calculator. В якості функції виберемо areaAve, в позиції Location виберемо OUT, в позиції Variable ставимо Pressure, та натиснемо Calculate.

Отримане значення $p = -46300.4$ [Pa]. Це і є шукане значення розрідження в колекторній камері.

8.5.19. Розраховуємо потужність, що витрачається двигуном на всмоктування за формулою $N = |p| \cdot V$, де V — витрата повітря крізь всмоктувальний патрубок, $V = v_k \pi d^2 / 4$, де $d = 0,033$ м — діаметр впускного каналу колектору. У відповідності з отриманими даними:

$$N = 46300 \cdot 66 \cdot 3,14 \cdot 0,033^2 / 4 = 2612 \text{ Вт},$$

або 3,6 к.с.

Контрольні питання.

1. У чому полягає різниця між стаціонарним (steady-state) та нестаціонарним (transient) аеродинамічним аналізом і коли застосовується кожен з них?
2. Як вибір кроку по часу впливає на точність та стабільність нестаціонарного CFD-розрахунку?
3. Які граничні умови слід враховувати при моделюванні нестаціонарної течії повітря у впускному тракті двигуна?
4. Як розрахувати потужність, що втрачається на подолання аеродинамічного опору?
5. Що таке початкові умови в нестаціонарному CFD-аналізі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

Дослідження просторового напружено-деформованого стану засобами САПР

9.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Мета роботи — засвоєння методів дослідження напружено-деформованого стану й міцності об'єктів засобами САПР.

Задача роботи — практичне засвоєння роботи САПР на прикладі вивчення напружено-деформованого стану просторових конструкцій.

9.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

9.2.1. Огляд задачі підготовки даних для моделювання методом скінченних елементів

Метод скінченних елементів (МСЕ) є ефективним інструментом, який використовується для комп'ютерного моделювання фізичних процесів, таких як розподіл механічних напружень, температурних полів, руху рідин і електромагнітних явищ. Найбільш широко цей підхід застосовується при аналізі напружено-деформованого стану (НДС) різноманітних конструкцій.

Багато сучасних програмних рішень або мають вбудовані засоби для створення геометричних моделей, або підтримують інтеграцію з CAD-системами, а часто й поєднують обидві можливості. Програми, орієнтовані на створення моделей за допомогою засобів автоматизованого проєктування, можуть безпосередньо працювати з CAD-даними (наприклад, з AutoCAD) або дозволяють імпортувати ці дані після попереднього перетворення. Зараз стає все популярнішим підхід «direct on CAD», який дозволяє уникати конвертаційних операцій, що можуть спричинити втрату інформації, і водночас скорочує час, необхідний для проходження циклу «проєктування — аналіз — корекція». Використання CAD-технологій також полегшує процес створення моделей, зокрема складних геометричних форм.

Сучасні системи моделювання часто є гібридними — вони поєднують об'ємне, поверхневе та каркасне моделювання з параметричним і об'єктно-орієнтованим підходами, що дозволяє будувати майже будь-яку потрібну для аналізу геометрію. Більшість програмних комплексів для МСЕ також підтримують імпорт геометрії як через стандартні проміжні формати (наприклад, IGES), так і безпосередньо з CAD-систем.

У більшості програмних систем, призначених для аналізу напружено-деформованого стану, етап створення розрахункової сітки та розміщення вузлів виконується безпосередньо в межах самої програми. Водночас багато з них підтримують інтеграцію з зовнішніми генераторами сіток, що дозволяє імпортувати вже побудовану сітку. Часто сітка прив'язується до геометричної моделі, тому при зміні геометрії автоматично оновлюється й відповідна сітка.

Складність та деталізація сітки безпосередньо впливають на розміри глобальної матриці жорсткості, складність чисельного розв'язання та обсяг необхідних обчислювальних ресурсів. Підвищення точності розрахунків досягається шляхом збільшення кількості елементів у сітці або використанням функцій апроксимації вищого порядку.

Скінченні елементи, які застосовуються у моделюванні, повинні відповідати певним критеріям. Зокрема, їх розмірність має збігатися з розмірністю області задачі — для одновимірних задач використовуються одновимірні елементи, для двовимірних — відповідно двовимірні тощо. Крім того, обрана програма має підтримувати обраний тип

елемента, тобто бути здатною враховувати його внесок у загальну матрицю жорсткості. Набір підтримуваних типів елементів утворює так звану бібліотеку елементів. Чим вона більша, тим ширший спектр задач можна розв'язати за допомогою даного програмного комплексу.

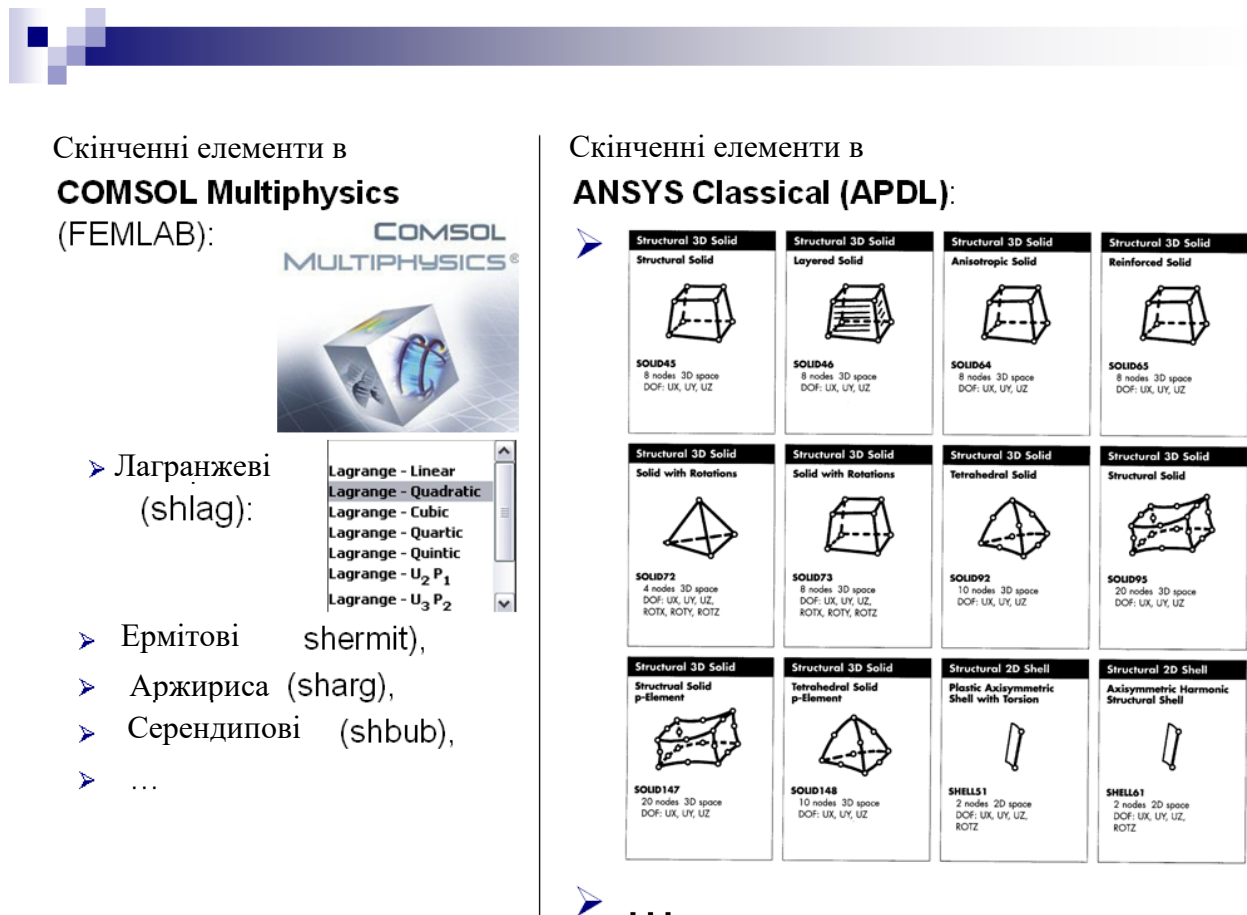


Рис. 9.1. Типи просторових скінченних елементів в різних САЕ-системах.

Після вибору типу скінченних елементів визначається характер аналізу — наприклад, статичний чи динамічний, лінійний або нелінійний, зосереджений на деформаціях, напругах чи інших фізичних параметрах. Кожен вузол моделі асоціюється з певними невідомими, або ступенями свободи, до яких належать переміщення, обертання, температура, тепловий потік тощо.

На наступному етапі задаються граничні умови. Для контурів об'єкта можуть бути визначені значення переміщень, зовнішніх навантажень чи температур, що фіксуються у конкретних граничних вузлах. У деяких випадках моделювання проводиться без задання граничних умов, або ж вузли спеціально розміщуються в точках дії зовнішніх впливів.

У більшості сучасних FEA-систем, що інтегруються з CAD, граничні умови можуть задаватися безпосередньо на геометричній моделі, після чого система автоматично переносить їх на відповідні вузли сітки. Існує багато способів задання навантажень і граничних умов, що дозволяє досить точно змоделювати широкий спектр ситуацій, близьких до реальних.

Кожен елемент моделі також повинен мати визначені матеріальні властивості. Як правило, це модуль пружності (модуль Юнга), коефіцієнт Пуассона, а для оболонкових і пластинчастих елементів — також товщина, що часто розглядається як частина матеріальних характеристик, а не геометрії, для уникнення переходу до тривимірного аналізу. У задачах теплопровідності чи гідродинаміки можуть задаватися інші властивості, такі як теплоємність або в'язкість. Різним елементам можна призначити різні

характеристики, що дозволяє моделювати об'єкти зі складною структурою. Найбільші труднощі при цьому виникають у процесі визначення взаємодії між різними частинами, тобто формування інтерфейсів.

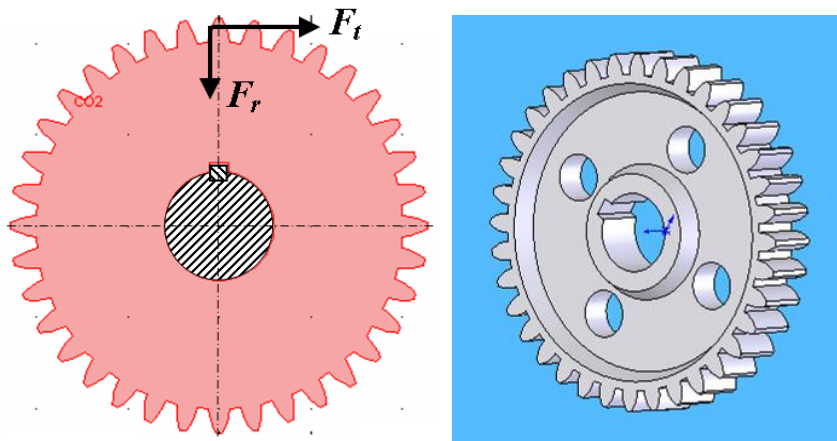
Після завершення створення скінченноелементної моделі з усіма необхідними параметрами, її передають в модуль розрахунку (Solver). Після виконання обчислень результати надходять до постпроцесора для подальшого аналізу. Більшість сучасних програмних комплексів дозволяють обчислювати широкий спектр характеристик і представляти їх у вигляді таблиць або графічних матеріалів. Найчастіше користувача цікавлять дані про деформації, напруження та зміни геометрії конструкції.

Для наочного представлення таких результатів широко застосовуються контурні діаграми, де параметри відображаються кольоровими градієнтами безпосередньо на моделі. Сучасні системи значно вдосконалили графічні можливості: можна виводити ізоповерхні з постійними значеннями певних характеристик або проводити аналіз на поперечних перерізах об'єкта.

У випадках, коли здійснюється динамічне моделювання, особливо корисною є функція анімації, що дає змогу відстежувати зміну стану об'єкта в часі, з урахуванням нелінійних ефектів. Більшість систем також підтримують експорт графіків, відеофрагментів або зображень у зручних форматах, придатних для використання у звітах, презентаціях або публікаціях в Інтернеті.

9.3. ЗАВДАННЯ

За допомогою будь-якої доступної системи аналізу методом скінченних елементів зробити аналіз напружено-деформованого стану зубчастого колеса з роботи №3. До одному із зубів, що перебуває над шпонковим пазом, прикладені радіальне F_r та окружне F_t навантаження. Колесо жорстко пов'язане з валом за допомогою шпонкового з'єднання:



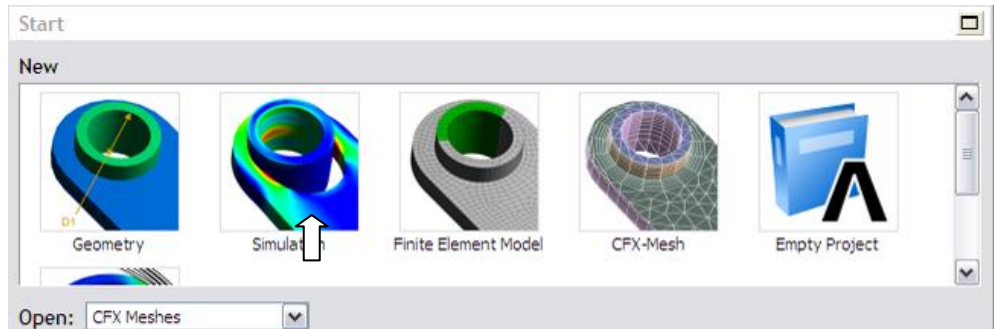
9.4. ХІД РОБОТИ

- 9.4.1. Створити новий файл із назвою роботи;
- 9.4.2. Задати значення параметрів матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густину);
- 9.4.3. Зчитати файл, створений у роботі №3;
- 9.4.4. Перейти до роботи в процесорі й задати граничні умови — попередньо розраховані сили F_r і F_t віднесені до площі зуба, умови контакту зі шпонкою, умови контакту з валом;
- 9.4.5. Розрахувати напружено-деформований стан зубчастого колеса;
- 9.4.6. Перейти до роботи в постпроцесорі й візуалізувати поля напруг та деформацій виробу. Дати висновок про міцність досліджуваної деталі;

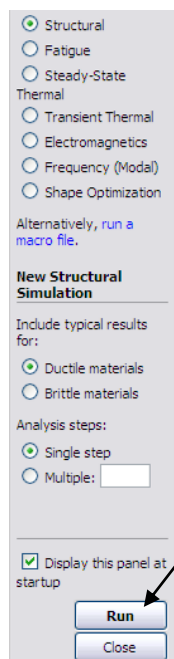
9.4.7. Зберегти результати розрахунків й прикласти до звіту по лабораторній роботі.

9.5. Приклад виконання завдання в середовищі ANSYS Simulation (компонент ANSYS Student)

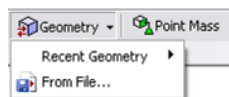
9.5.1. Запускаємо програму **ANSYS Simulation** із середовища **ANSYS Workbench**:



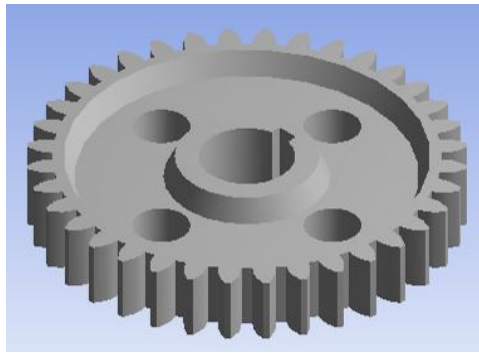
9.5.2. В системі проводимо вибір налаштувань для структурного аналізу — **Structural** з панелі **Simulation Wizard** та натискаємо **Run**:



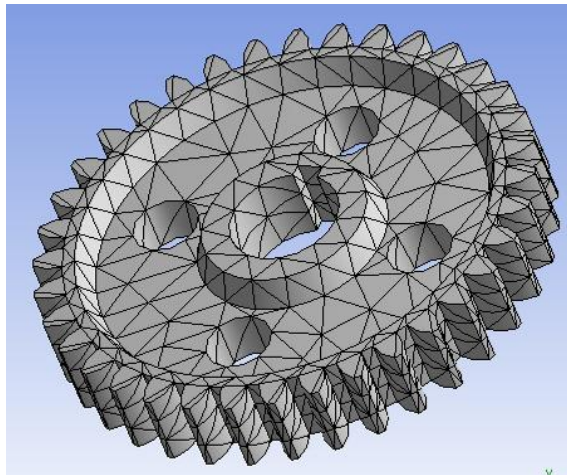
9.5.3. В головному меню в позиції **Geometry** відкриваємо вкладку **From File**:



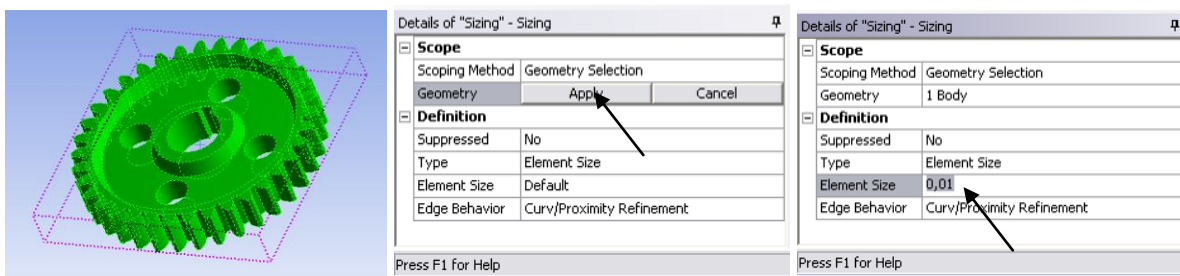
та вибираємо файл **Zubch.IGS**:

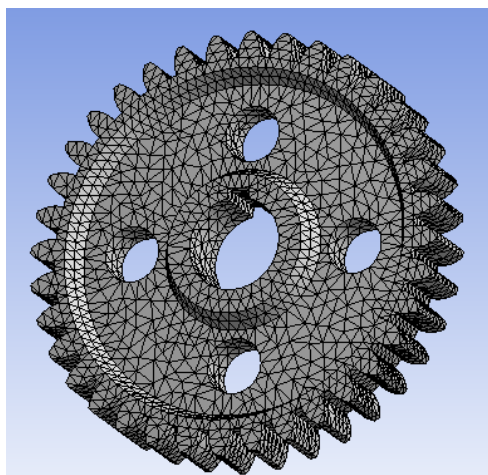


9.5.4. Проведемо попереднє розбиття моделі на сітку скінченних елементів. Для цього в дереві проєкту в позиції Mesh виберемо Preview Mesh:

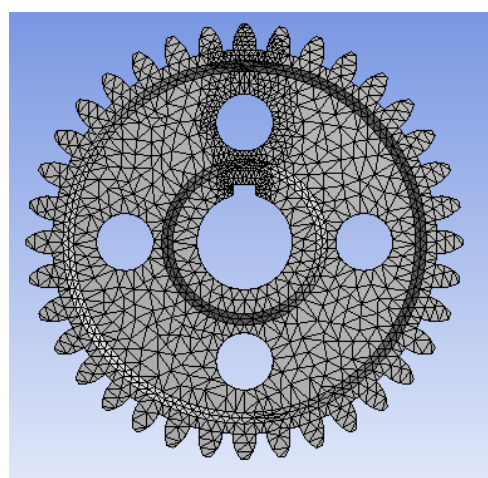


9.5.5. Отримана сітка має досить погану якість. Для покращення розбиття в дереві проєкту в позиції Mesh зробимо вставку Insert (права кнопка миші) -> Sizing. В меню інструментів виберемо фільтр захвату об'ємів    . Якщо у вікні Details of Sizing в позиції Geometry вказано No Selection, натиснемо на вказану строку, та з екрану зробимо вибір зубчастого колеса, після цього вказуємо розмір елементу Element Size (використовуємо кому замість крапки), та знов використовуємо Preview Mesh:

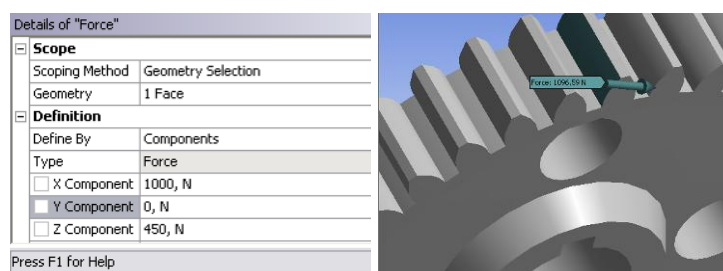




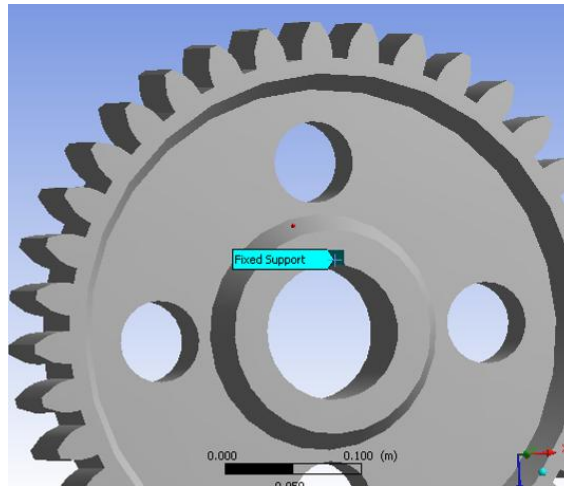
За необхідності проводимо згущення сітки біля шпонкового пазу та на геометрії зуба:



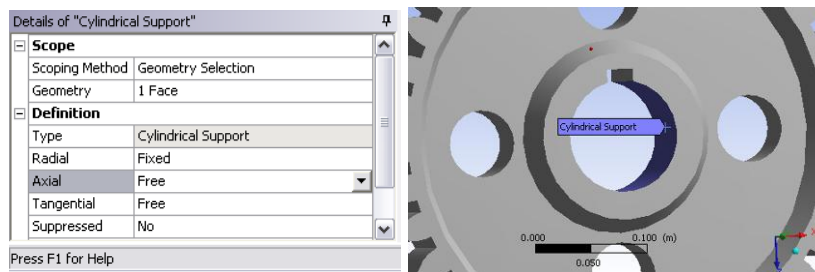
9.5.6. Задамо граничні умови, для цього в дереві проєкту зробимо вставку в позиції Environment (п.к.м.) -> Insert -> Force. У вікні Details of “Force” в позиції Define by виберемо Components, та вкажемо значення відповідних компонент вектору сили (F_r та F_t), а в позиції Geometry виберемо поверхню зуба:



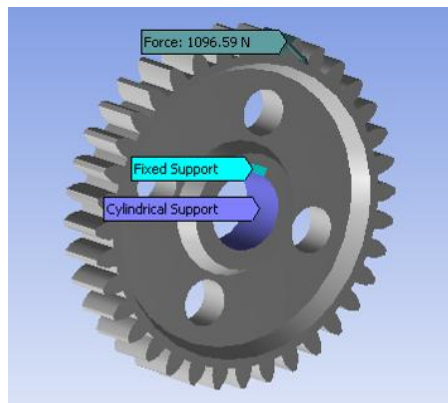
9.5.7. Аналогічним чином задаємо жорстке затиснення по протилежній поверхні шпонкового пазу — Environment (п.к.м.) -> Insert -> Fixed Support, та вказуємо протилежну до дії сили поверхню шпонкового пазу:



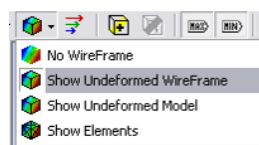
На посадковій поверхні аналогічно вкажемо Cylindrical Support з наступними фіксаціями:



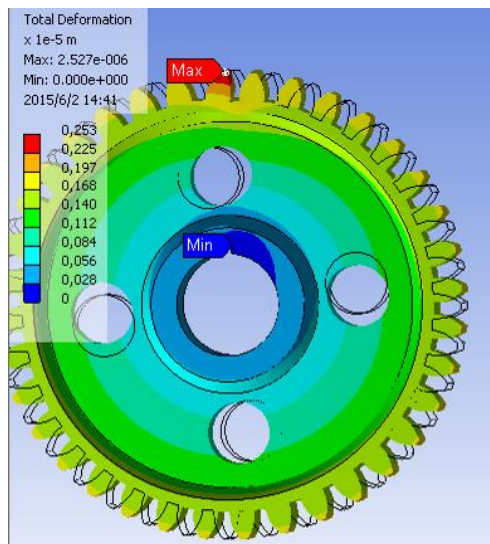
Таким чином після препроцесінгу маємо:



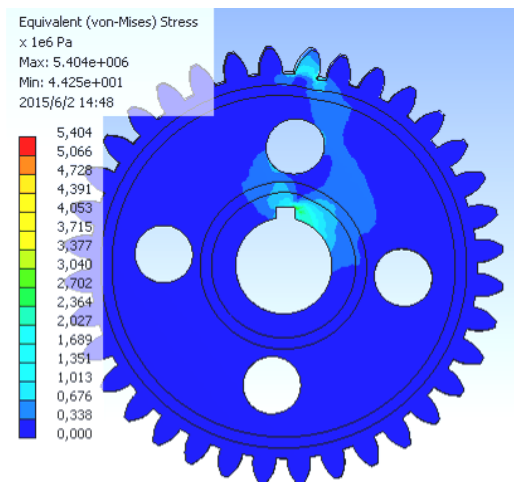
Проводимо розрахунок моделі: в дереві проєкту Model ->(п.к.м.) -> Solve
 9.5.8. Після розрахунків в дереві проєкту вибираємо позицію Total Deformation з включенням відображення недеформованого каркасу моделі:



Максимальна деформація зубу досягає 2,5 мкм:



Розподіл еквівалентних напруг за Мізесом (Equivalent Stress):



Пікові напруги становлять 5,4 МПа, тому для сталюого виробу міцність виконується.

Контрольні питання.

1. Які основні фізичні величини характеризують лінійний напружено-деформований стан у конструкціях?
2. Що таке тензор напружень і тензор деформацій, і як вони відображаються у САПР?
3. Як інтерпретувати результати розрахунку напружень у тривимірній моделі в САПР?
4. Які граничні умови зазвичай задаються при моделюванні просторового напружено-деформованого стану?
5. Як використовуються результати аналізу напружено-деформованого стану для оптимізації конструкцій у САПР?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

Дослідження напружено-деформованого стану засобами САПР. Лінійні та плоскі скінченні елементи

10.1. МЕТА Й ЗАДАЧА РОБОТИ

Ціль роботи — засвоєння методів дослідження напружено-деформованого стану й міцності об'єктів засобами САПР.

Задача роботи — практичне засвоєння роботи САПР на прикладі вивчення напружено-деформованого стану конструкцій, що моделюються плоскими скінченними елементами.

10.2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

10.2.1. Лінійні та плоскі скінченні елементи.

Окрім тривимірних елементів, що застосовуються для моделювання твердо тільних конструкцій, у скінченноелементному моделюванні також застосовують лінійні та плоскі елементи. Універсальні програмні комплекси, що підтримують багатобразне моделювання, дозволяють комбінувати в одній моделі різні типи елементів.

Лінійні скінченні елементи (ЛСЕ) мають форму лінії — прямої або кривої — яка сполучає два вузли. У механічному аналізі найбільш поширеними є наступні види таких елементів:

- фермовий елемент (**truss**) має 2 вузли і передає зусилля лише в аксіальному напрямку (дозволяє лише розтягнення/стиск, і не підтримує кручення та згин). Фермовий елемент зазвичай використовуються для моделювання веж і мостів. Передбачається постійна площа поперечного перерізу;

- стрижень (**rod**) застосовується для розрахунків на розтяг і кручення. Його форма може задаватися вручну або обиратися з бази даних, і зазвичай використовується для розрахунків підвісів;

- балка (**beam**) може працювати на розтягування, вигин і кручення. Дає змогу задавати змінні по довжині геометричні характеристики, які можуть бути як стандартними (наприклад, тавровий профіль), так і створеними користувачем. Такий елемент також може враховувати деформацію тонкостінних профілів у випадках поперечного згину чи стиснутого кручення;

- пружина (**spring**) — це елемент без маси, який характеризується певною жорсткістю на розтяг або кручення. Його механічні властивості не залежать від довжини;

- демпфер (**dashpots**) — може імітувати в'язке демпфування;

- елемент зазор (**gap**) використовується для опису взаємодії між деталями, де є початковий проміжок. Він поводить як пружина зі ступінчасто змінною жорсткістю, яка змінюється в залежності від того, перевищує деформація початковий зазор чи ні.

У деяких задачах також використовуються спеціалізовані елементи:

- маса (**mass**) дозволяє вказати масу та момент інерції в конкретному вузлі, що актуально для динамічного аналізу, коли жорсткість певних компонентів не суттєва, але їх масово-інерційні характеристики мають значення;

- абсолютно жорсткий елемент (**rigid**) створює абсолютно жорсткий зв'язок між вузлами. Такий елемент зручно застосовувати для передачі навантаження чи з'єднання елементів різного типу, наприклад, стрижнів та об'ємних елементів;

- лінія ковзання (**slide line**) використовується для моделювання контакту між поверхнями, що деформуються й рухаються відносно одна одної. Вона дозволяє враховувати статичне й динамічне тертя між тілами та визначати область контакту.

Плоскі скінченні елементи застосовуються для моделювання тонкостінних конструкцій, таких як пластини, оболонки та інші подібні об'єкти. Найчастіше використовуються трикутні або чотирикутні елементи, в яких вузли розташовані у вершинах (рис. 10.1, а). Крім того, для підвищення точності розрахунків використовують так звані параболічні елементи — з додатковими вузлами, розташованими на сторонах між основними (рис. 10.1, б).

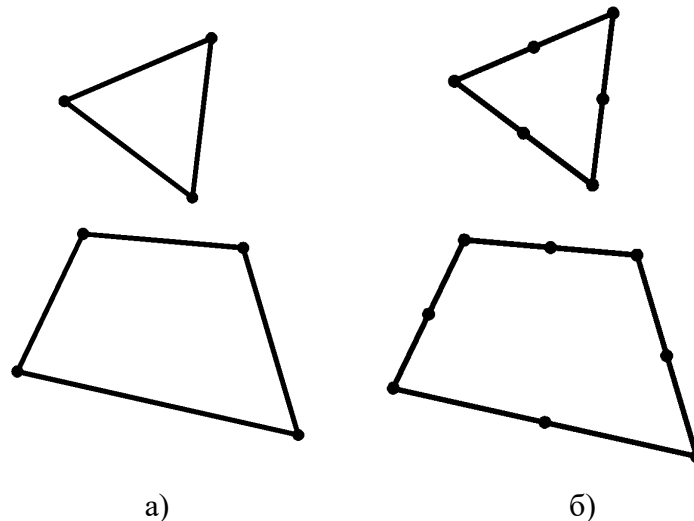


Рис. 10.1 — Плоскі скінченні елементи.

Найпоширенішими видами плоских скінченних елементів є:

- пластина (**plate / shell**) — цей тип елементів дозволяє враховувати основні внутрішні зусилля, зокрема мембранні, зсувні, поперечні та згинальні, забезпечуючи при цьому відносно низьке навантаження на обчислювальні ресурси. У системах на кшталт **NASTRAN** та **ANSYS** пластина часто виступає елементом за замовчуванням. Основною геометричною характеристикою пластини є її товщина, яка, за потреби, може змінюватися по довжині елемента, імітуючи форму клина або призми. Це дозволяє ефективно моделювати складну тривимірну геометрію з використанням плоских елементів. Можна окремо виділити елементи, що моделюють композитні матеріали — багатошарові пластини, кожна з яких може мати власну товщину та матеріал;

- мембрана (**membrane**) — спеціалізований тип плоского елемента, призначений для моделювання тонких гнучких структур, коли товщина набагато менша за радіус вигину. Мембрана сприймає лише навантаження в площині й не передає згинальних моментів, проте її використання дозволяє знизити обчислювальні затрати.

Деякі з перерахованих лінійних та плоских елементів показані на рис. 10.2.

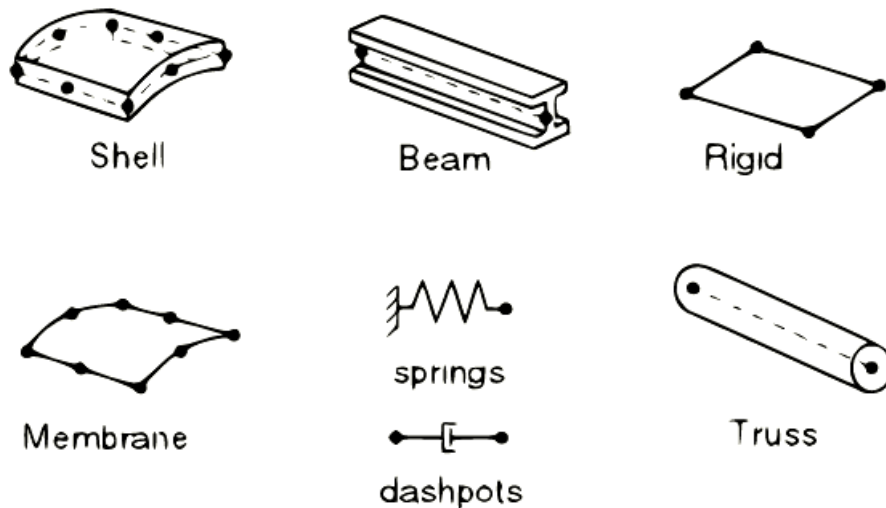


Рис. 10.2 — Лінійні та плоскі скінченні елементи.

10.3. ЗАВДАННЯ

Провести засобами доступних скінченноелементних CAE систем розрахунок статичної деформації рами вантажного автомобіля за методом скінченних елементів. Використовувати плоский оболонковий скінченний елемент типу shell, товщиною 5 мм.

10.4. ХІД РОБОТИ

10.4.1. Створити в CAD системі за доступними кресленнями модель рами автомобіля використовуючи тільки поверхневе моделювання. Зберегти в нейтральному форматі;

10.4.2. В системі скінченноелементного аналізу задати значення параметрів матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густину);

10.4.3. Зчитати нейтральний файл рами автомобілю;

10.4.4. Перейти до роботи в процесорі й задати граничні умови — попередньо розраховані зовнішні сили, умови в місцях опор;

10.4.5. Створити скінченноелементну сітку;

10.4.6. Розрахувати напружено-деформований стан рами автомобіля;

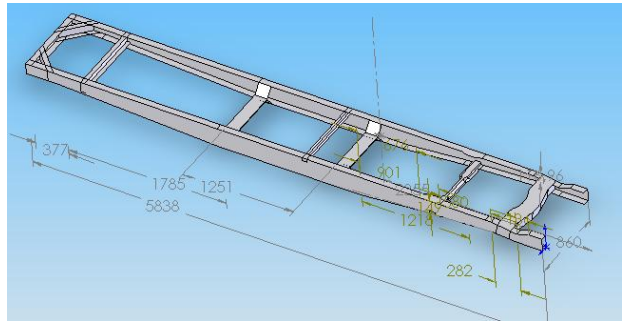
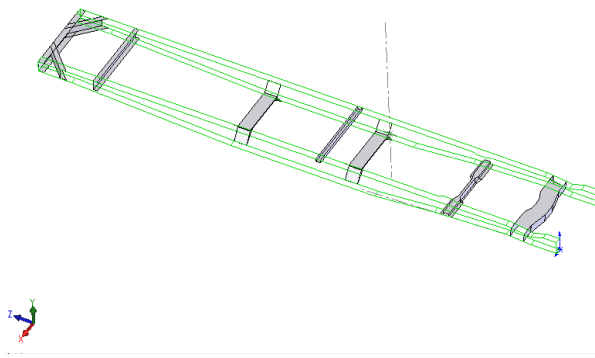
10.4.7. Перейти до роботи в постпроцесорі й візуалізувати поля напруг та деформацій. Дати висновок про міцність досліджуваної конструкції;

10.4.8. Зберегти результати розрахунків й прикласти до звіту по лабораторній роботі.

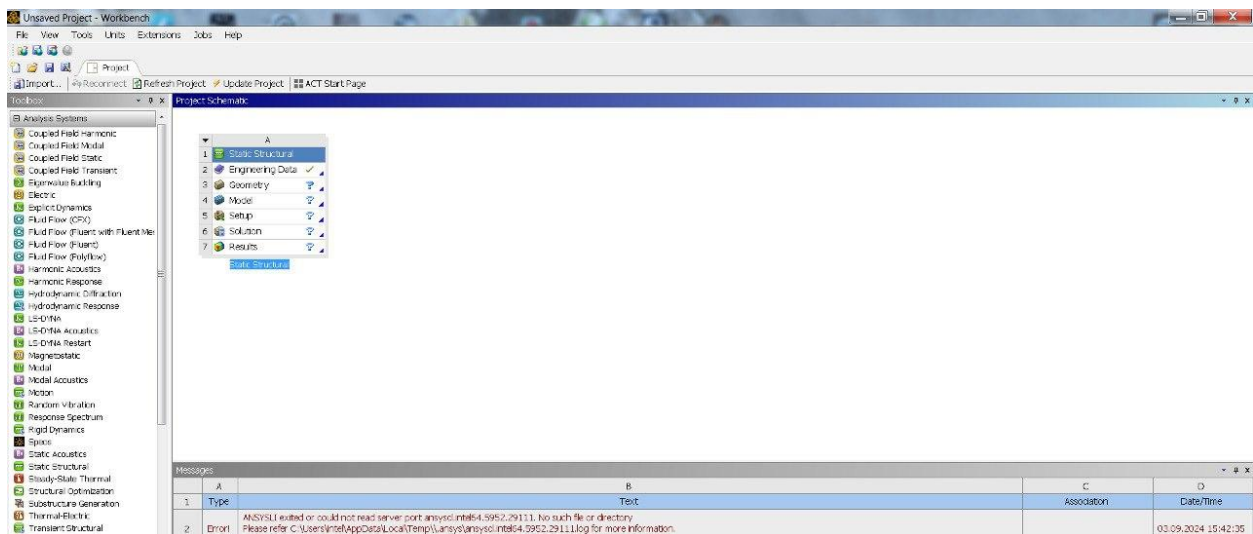
10.5. Приклад виконання завдання в середовищі ANSYS Simulation (компонент ANSYS Student)

CAD-модель рами вантажного автомобіля має вигляд:

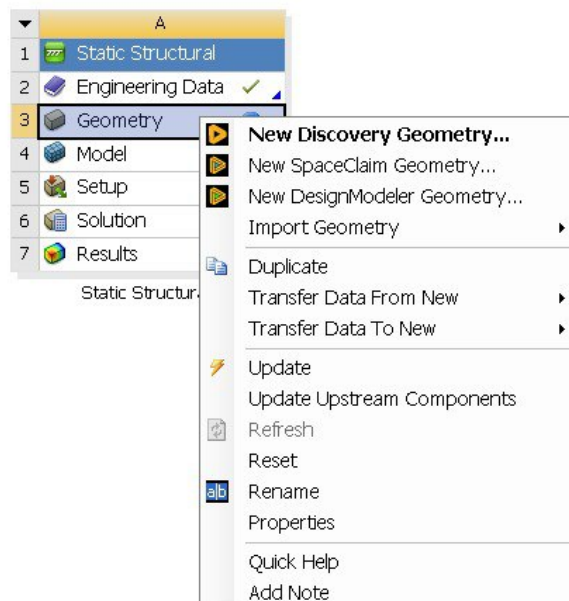




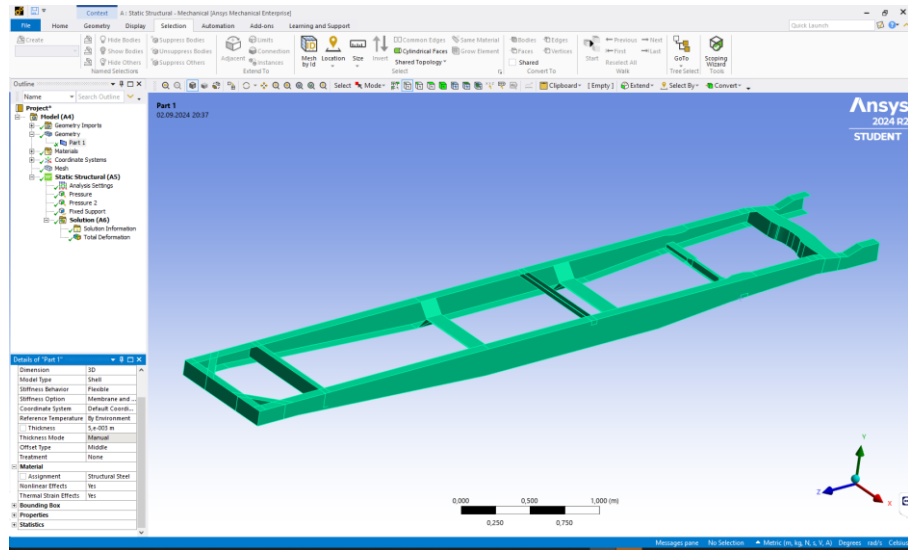
Розрахунок проводиться засобами системи ANSYS Workbench що є частиною пакету ANSYS Student. В системі ANSYS Workbench в полі проєкту активується послідовність аналізу напружено-деформованого стану простим перетягуванням з Toolbox:



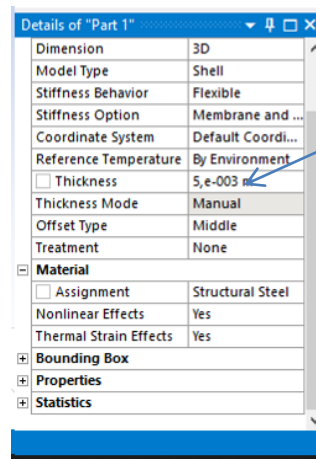
Імпортуємо в модуль геометрії CAD-модель в нейтральному форматі (правий клік на відповідному ярлику):



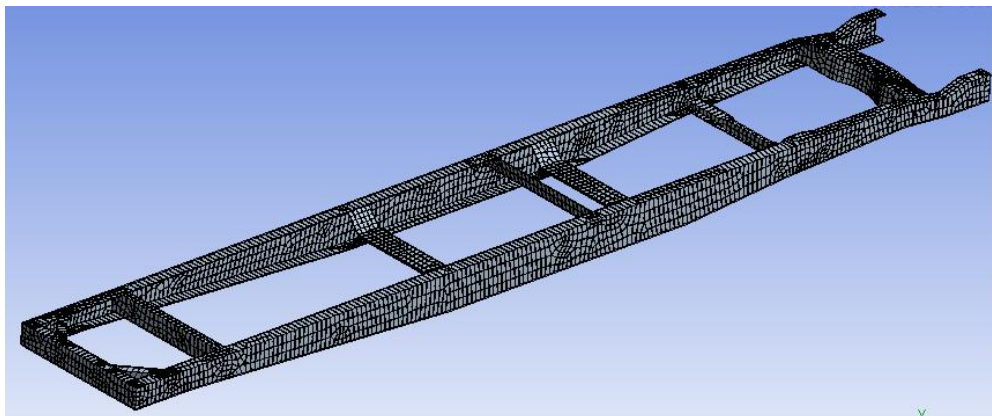
Після цього запускається подвійним кліком налаштування моделі Model:



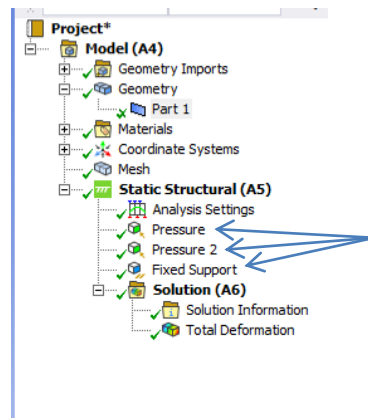
В позиції Geometry вказується товщина скінченного елемента Shell:



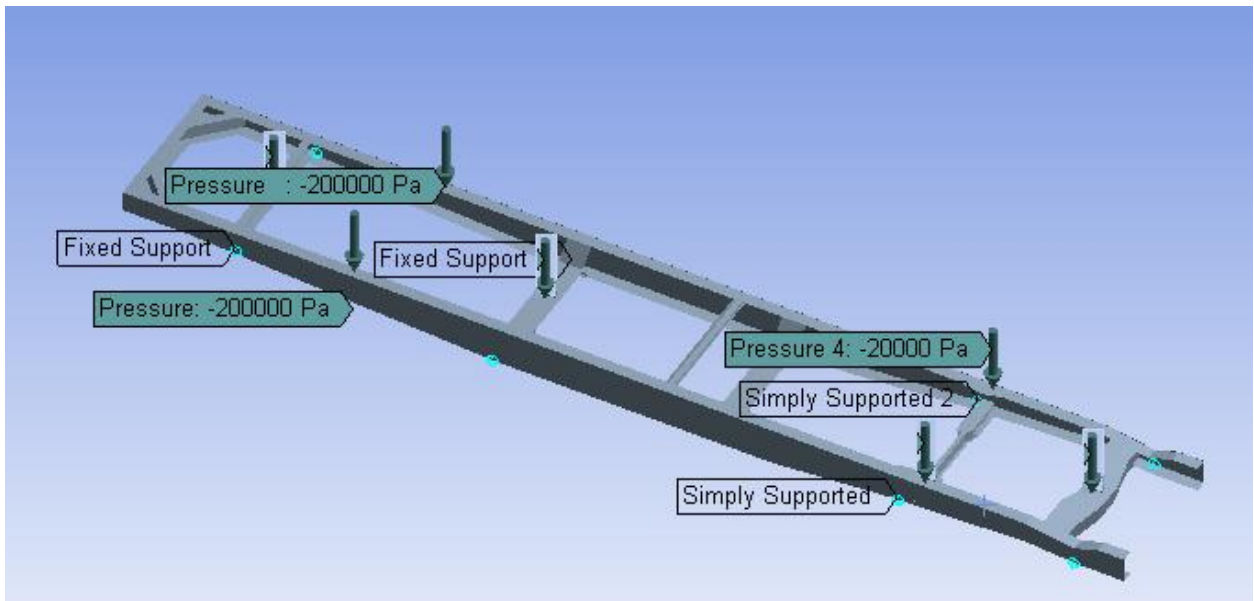
Проводиться розбиття на скінченні елементи в позиції дерева проєкту Mesh — Generate:



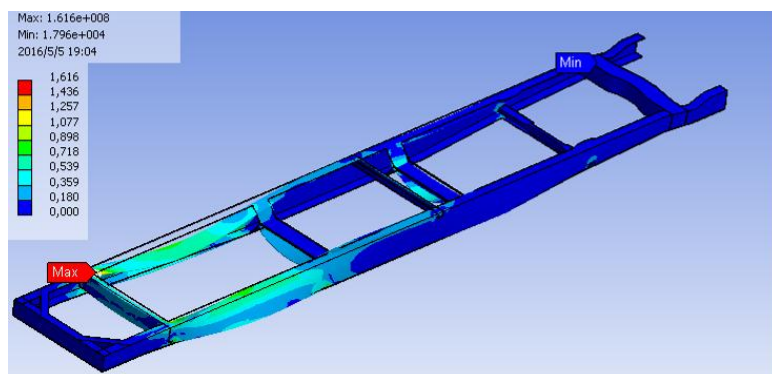
В дереві проєкту в позиції Static Structural задаються відповідні граничні умови



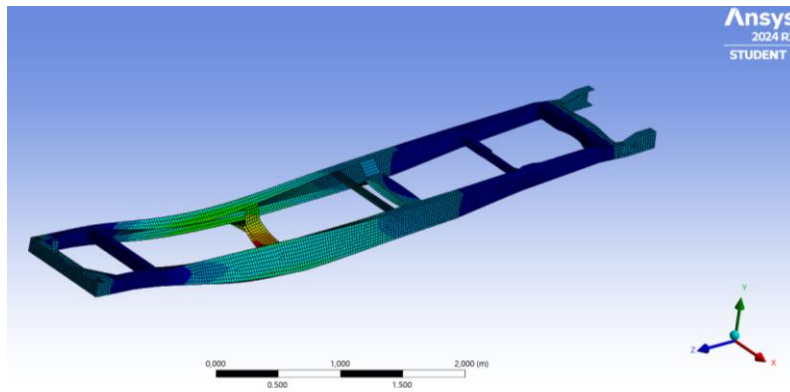
як вказано на рисунку:



Проводиться генерування розрахунку в позиції Solution — Generate. Виводяться (Solution — Insert) результати:



— напруги за Мізесом,



та загальні деформації.

Максимальні внутрішні напруги дорівнюють $\sigma_{\max}=162$ МПа. Відповідні реакції опор становлять:

$$R_{\Pi} = 2100 \text{ Н}, R_3 = 26000 \text{ Н},$$

що відповідає сумарному навантаженню

$$\Sigma = 2 R_{\Pi} + 2 R_3 = 56200 \text{ Н} = 5620 \text{ кг}.$$

Дане навантаження відрізняється від заданого на

$$1 - 620/(4000+1700) = 1,4\%,$$

що говорить про досить хороше сіткове наближення та розрахунок тисків.

Максимальні прогини становлять $f_{\max}=3,9$ мм, що відповідає рекомендаціям статичного навантаження.

Контрольні питання.

1. В чому полягає відмінність між лінійними, плоскими та об'ємними скінченними елементами?
2. Які типи геометричних моделей описують лінійні скінченні елементи?
3. Для яких задач застосовуються плоскі скінченні елементи у САПР?
4. Як задаються граничні умови при використанні лінійних і плоских скінченних елементів?
5. Які типи деформацій найбільш характерні для плоских скінченних елементів?

ЛІТЕРАТУРА

1. Kunwoo Lee. Principles of CAD/CAM/CAE. — Pearson; 1st edition (January 20, 1999). — 560 p.
2. ДСТУ 2226-93. Автоматизовані системи. Терміни та визначення. — [Чинний від 1994-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1994. 93 с.
3. Pierre Germain-Lacour. Mathematiques et CAO. — Universite de Metz: Hermes Publishing, 1986-1987. — 264 p.
4. Баганов Є.О. Методи розрахунків на ЕОМ. Навчальний посібник. — Херсон: Олді-плюс, 2009. — 288с.
5. Павленко І. В. Метод скінчених елементів в задачах опору матеріалів і нелінійної теорії пружності: навчальний посібник. — Суми : Вид-во СумДУ, 2006. — 147 с.
6. Карпіловський В.С. Метод скінчених елементів і задачі теорії пружності. — Київ: «Софія А», 2022. — 275 с.
7. Пальчевський Б.О. Системи 3D моделювання : навч. посіб. / Б.О. Пальчевський, Б.П. Валецький, Т.Л. Вараніцький. — Луцьк, 2016. — 175 с.
8. Саєнко С. Ю. Основи САПР / С. Ю. Саєнко, І. В. Нечипоренко — Х.: ХДУХТ, 2017. — 120 с.
9. Баженов В. А., Криксунов Е. З., Перельмутер А. В., Шишов О. В. Системи автоматизованого проектування. Підручник для вузів. — К.: Каравела, 2019. — 488 с.
10. Меркулов В.С. Системи автоматизованого проектування рухомого складу: Конспект лекцій. — Харків: УкрДУЗТ, 2016 — Ч. 1. — 90 с.
11. Шевченко, В.Ф. Автоматизоване проектування вагонів: навч. посібник / В.В. Шевченко, В.Ф. Головка. — Харків: УкрДАЗТ, 2008. — 214 с.
12. Гідрогазодинаміка: Навчальний посібник / укл. Гавалешко Н.М., Горлей В.В. — Чернівці: Рута, 2006. — 84 с.
13. Озарків І. М. Основи аеродинаміки і тепломасообміну: навч. посібн. / І. М. Озарків, Л. Я. Сорока, Ю. І. Грицюк. — К. : Вид-во ІЗМН, 1997. — 280 с.
14. Теорія руху автомобіля: підручник / В. П. Волков, Г. Б. Вільський. — Суми : Університетська книга, 2010. — 320 с.
15. Protsenko, V., Rusanov, S., Kliuev, O., Voitovych, O., Protasov, R. Improvement of the internal combustion engine sleeve spring packets equipped coupling calculation model // Strojnický Casopis, 2024, 74(3), p. 89–96.
16. Edgar J. A Century of Car Aerodynamics: the Science and Art of Cars and Airflow. Amazon Digital Services LLC, 2021. 218 p.
17. Piechna J., Kurec K., Broniszewski J., Remer M., Piechna A., Kamieniecki K., Bibik P. Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering. Energies. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 689.
18. Katz J. Automotive aerodynamics. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. 590 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Твердотільні моделі в CAD-системах. Загальні принципи.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Твердотільні моделі в CAD-системах. Обертове замітання, фаски та заокруглення.	24
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Масиви елементів в CAD-системах.....	32
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. Багатотільні моделі та операції з ними в CAD-системах	40
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. Генератори сіток. Загальні принципи	52
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. Генератори сіток. Інфляція призматичних комірок	63
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. Аеродинаміка автомобіля в CFD-системах	72
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. Нестационарні задачі в CFD-системах на прикладі розрахунку газодинаміки в дифузорі та впускному колекторі	82
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9. Дослідження просторового напружено-деформованого стану засобами САПР	94
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10. Дослідження напружено-деформованого стану засобами САПР. Лінійні та плоскі скінченні елементи.....	102
ЛІТЕРАТУРА.....	109

Навчальне електронне видання

Сергій Русанов
Олег Ключєв
Владислав Проценко

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчально-методичний посібник

для студентів технічних закладів вищої освіти

ISBN 978-617-8187-57-6 (електронне видання)

Підписано до видання 15.09.2025 р. Формат 60×84/8.

Гарнітура Times.

Ум. друк. арк. 13,75. Обл.-вид. арк. 14,78.

Замовлення №3241.



Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С.
Свідоцтво про внесення до державного реєстру суб'єктів видавничої справи:
Серія ХС №48 від 14.04.2005 р.
Видано Управлінням у справах преси та інформації
73000, Україна, м. Херсон, вул. Соборна, 2.
Тел. +38(050)133-10-13
e-mail: printvvs@gmail.com