

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт

з навчальної дисципліни

«Математичне моделювання робочого процесу гідравлічних машин»

для студентів денної та заочної форм навчання

за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»,

освітня програма «Прикладна механіка»

Затверджено редакційно-
видавничою радою університету,
протокол № 2 від 27.06.2024 р.

Харків
НТУ «ХП»

2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Математичне моделювання робочого процесу гідравлічних машин» для студентів денної та заочної форм навчання за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітня програма «Прикладна механіка» / уклад.: Роговий А.С., Панамарьова О.Б. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2024. – 60 с.

Укладачі: А.С. Роговий
 О.Б. Панамарьова

Рецензент доц. Тиньянова І.І.

Кафедра гідравлічних машин ім. Г.Ф. Проскури

ЗМІСТ

Стор.

1. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 1-2. Розрахунок течії в каналі	4
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. Методи побудови сіток.....	17
3. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 4-5. Розрахунок передачі теплоти від газу до води через тверді стінки труби	27
4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 6-8. Проектування відцентрового насоса, розрахунок течії в ньому та його характеристики	35
ЛІТЕРАТУРА.....	55

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 1-2. РОЗРАХУНОК ТЕЧІЇ В КАНАЛІ

Мета роботи: знайомство з використанням пакетів прикладних програм для розрахунків течії рідини.

Необхідно порівняти втрати повного тиску при течії в коліні та в закругленому коліні із поворотом на 90° (рис. 1.1). Труба постійного діаметра 20 мм. Швидкість води на вході в трубу становить 1м/с, робочий тиск 1 атм.

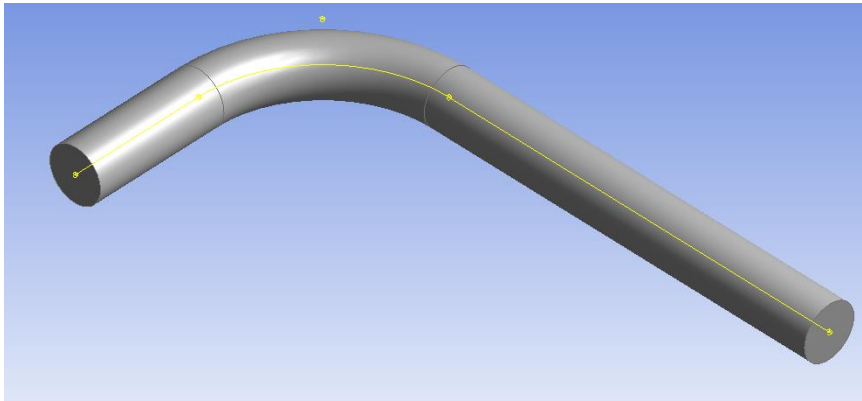


Рисунок 1.1 – Закруглене коліно із плавним поворотом на 90°

Чисельні методи рішення рівнянь у частинних похідних розвинені досить добре й на сьогоднішній день знайшли широке застосування в різних галузях науки й техніки [1]. На даний час використовуються три основних підходи до чисельного рішення рівнянь у частинних похідних. Для задач течій рідин та газів застосовують метод скінченних об'ємів. Цей метод застосовується в багатьох обчислювальних гідродинамічних (CFD) пакетах. В пакеті програм Ansys є можливість розрахунку за цим методом течій рідин за допомогою програм CFX, Fluent та PolyFlow. Вирішення даної та інших задач будемо проводити в програмі Ansys CFX [2].

Для створення проекту натиснемо кнопку «New» на верхній панелі. Тепер знаходимо у вікні «Toolbox», у підрозділі «Analysis Systems» пункт «Fluid Flow (CFX)» («Течія рідини»). У результаті вікно проекту повинне виглядати так само, як показано на рис. 1.2.

Компонент «Fluid Flow (CFX)» складається з наступних частин: «Geometry» («Геометрія»), «Mesh» («Сітка»), «Setup» («Налаштування розрахунку»), «Solution» («Рішення задачі») і «Results» («Аналіз результатів»).

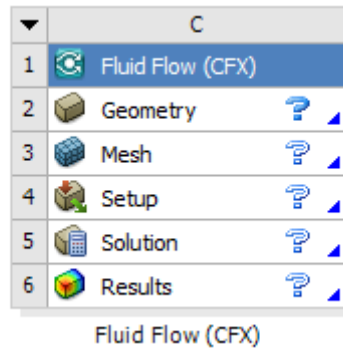
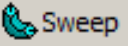


Рисунок 1.2 – Вікно проекту після створення компонента «Fluid Flow (CFX)»

1.1. «Geometry». Під час розрахунку течій газів і рідин, насамперед, нас цікавить побудова геометрії самого обсягу рідини або газу, а не тіла, яке обтікає потік. Внаслідок цього, в багатьох задачах гідро- та аеродинаміки, геометрія й сітка будуються тільки для рідкого об'єму. При цьому тверде тіло представляється у вигляді «порожнини» у цьому рідкому об'ємі.

Побудова моделі починається з вибору в дереві побудови площини XY, після чого на панелі інструментів натискаємо кнопку «New sketch». Для рисування ескізу поперечного перерізу труби використаємо інструмент Circle (окружність). Тепер поставимо діаметр окружності – 20 мм, перейшовши на вкладку «Dimensions». Для цього виберемо тип розміру «Diameter». У результаті всіх маніпуляцій у нас повинен вийти ескіз, зображений на рис. 1.3.

Для побудови труби скористаємося командою протягання уздовж контуру (Sweep) , але для виконання цієї операції нам попередньо необхідно побудувати ескіз на прямої кривої.

У дереві побудови обираємо площину ZX, після чого на панелі інструментів натискаємо кнопку «New sketch». Для рисування ескізу прямої використаємо інструмент Line.

Будуємо дві лінії: першу лінію горизонтальну (ідентифікується буквою H під час побудови, а другу, вертикальну – буква V під час побудови. Поставимо розміри кожної з ліній, перейшовши на вкладку «Dimensions». Для цього виберемо тип розміру «Length/Distance». Розмір початкової ділянки труби встановлюємо 100 мм, другої ділянки – 200 мм. У результаті всіх маніпуляцій у нас повинен вийти ескіз, зображений на рис. 1.4.

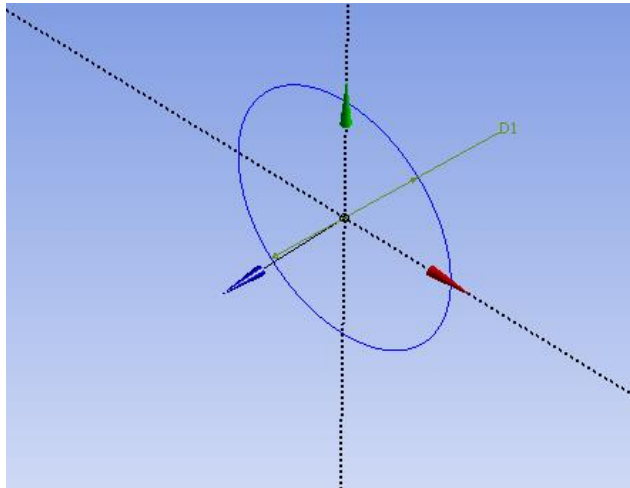


Рисунок 1.3 – Ескіз поперечного перерізу коліна

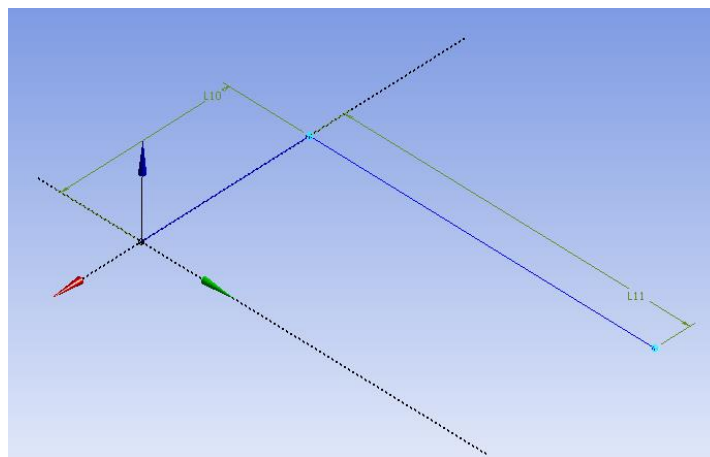


Рисунок 1.4 – Ескіз напрямної

Якщо ми хочемо зробити плавний поворот, то необхідно скористатися операцією «Fillet» (Скруглення), що знаходиться у вкладці «Modify» вікна «Sketching Toolboxes» (рис. 1.5).

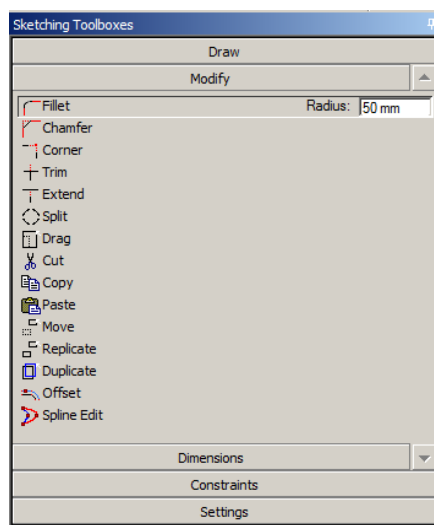


Рисунок 1.5 – Виконання операції скруглення

Вибираємо радіус скруглення 50 мм і по черзі виділяємо дві лінії, скруглення між якими ми хочемо одержати. У результаті всіх маніпуляцій у нас повинен вийти ескіз, зображений на рис. 1.6.

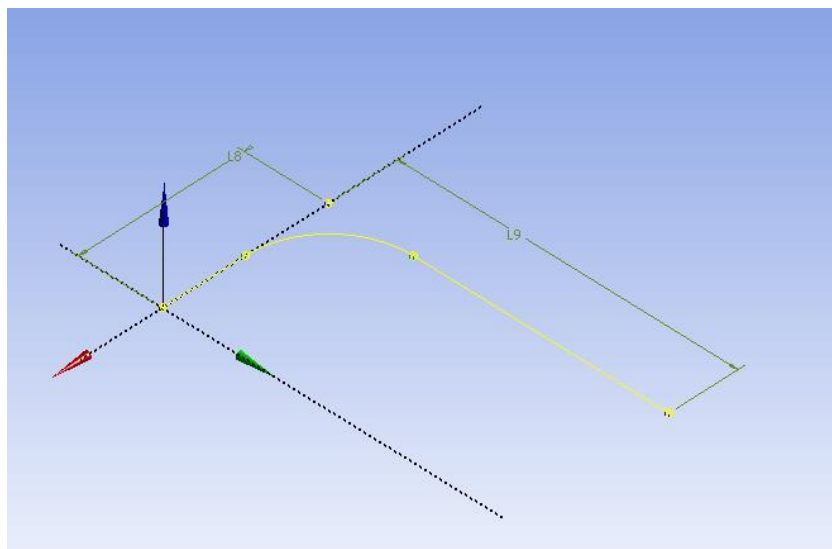


Рисунок 1.6 – Ескіз напрямної коліна зі скругленням

Протягання уздовж контуру (Sweep) дозволяє одержати об'єм шляхом переміщення базового ескізу вздовж напрямної кривої. Основні параметри команди: Profile – базовий ескіз для створення об'єму; Path – ескіз напрямної кривої; Alignment – спосіб вирівнювання контуру базового ескізу стосовно напрямної кривої. За умовчужанням задається як Path Tangent – контур зберігає первісну орієнтацію стосовно напрямної кривої. Значення Global Axis зберігає орієнтацію контуру щодо осей координат; Scale – масштабний коефіцієнт. Дозволяє масштабувати контур базового ескізу наприкінці напрямної кривої; Twist Specification – параметр, що дозволяє задавати опції при повороті контуру базового ескізу навколо напрямної кривої. За умовчужанням відключений (No Twist) і може приймати значення Turns – у цьому випадку задається число обертів навколо напрямної кривої – і Pitch – задається довжина шляху, що проходить контур при повороті. Значення для Turns й Pitch можуть бути негативними – це означає поворот за годинниковою стрілкою. Необхідно відзначити, що контур і напрямна крива повинні перебувати в різних ескізах. Базовий ескіз може містити як кілька контурів (у тому числі й незамкнених), так й окремі точки. Напрямна крива може бути замкнутою, але вона обов'язково повинна бути єдиним контуром в ескізі.

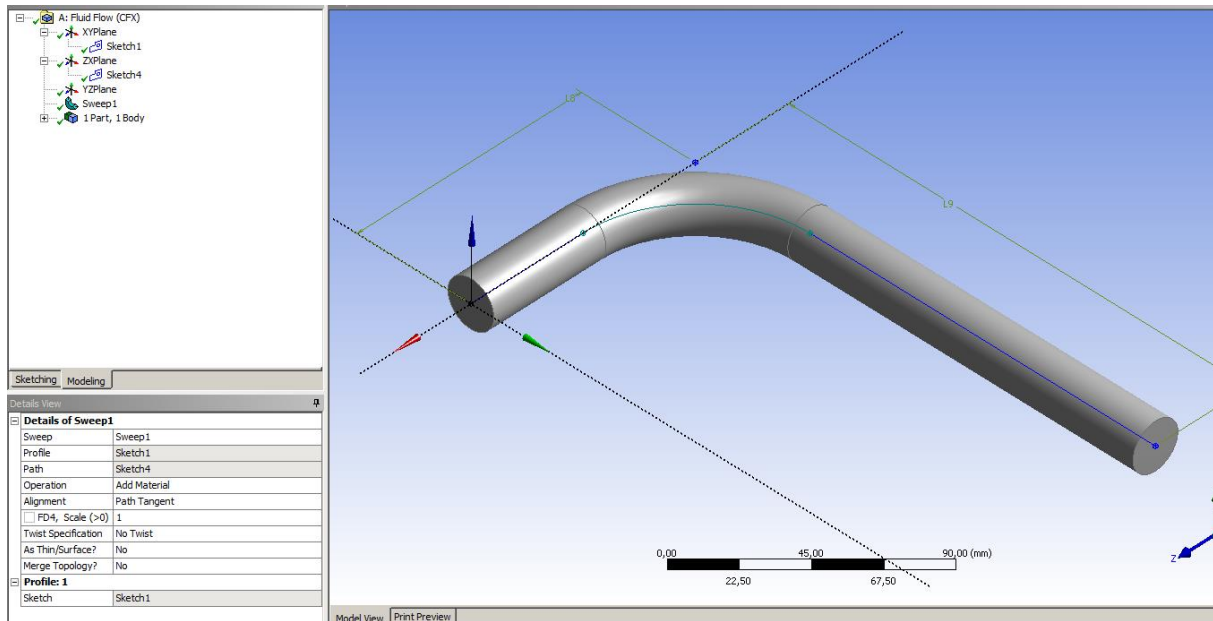



Рисунок 1.7 – Остаточний результат побудови твердого тіла

Встановлюємо ескізи, що відповідають поперечному перерізу та напрямній, після цього натискаємо на піктограму  **Generate** для генерації твердого тіла. У результаті одержуємо тверде тіло, представлене на рис. 1.7. Далі зберігаємо проект і закриваємо Ansys Design Modeler.

1.2. Mesh. Побудуємо сітку з параметрами, наведеними на рис. 1.8.

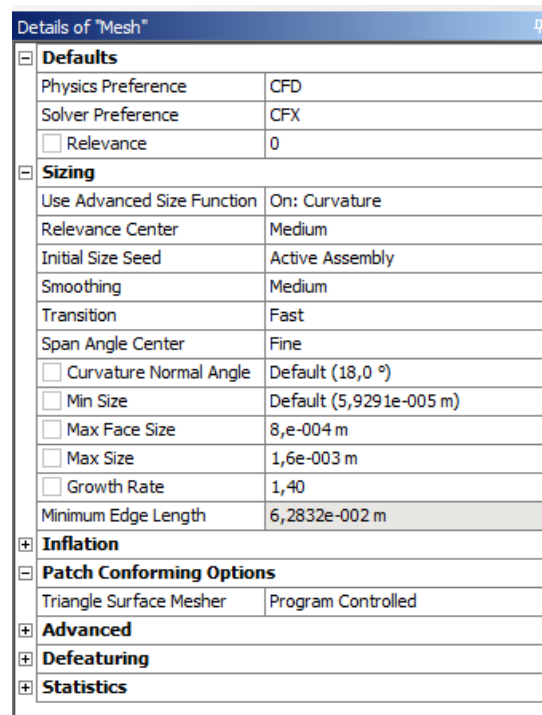


Рисунок 1.8 – Параметри сітки

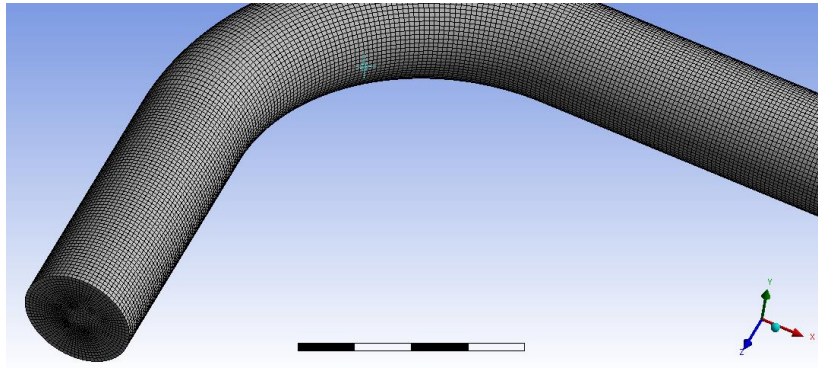


Рисунок 1.9 – Попередній перегляд поверхневої сітки

Для попереднього перегляду поверхневої сітки перед запуском на розрахунок потрібно виконати команду Preview Surface Mesh з контекстного меню групи Mesh. Результат побудови поверхневої сітки з параметрами за умовчужанням показаний на рис. 1.9.

У задачах гідрогазодинаміки необхідно подрібнювати сітку поблизу твердих стінок, внаслідок наявності прикордонних шарів й особливостей гідродинаміки в них. Для цього виконаємо наступне: натискаємо кнопку Inflation, що знаходиться у вкладці Mesh, як показано на рис. 1.10.

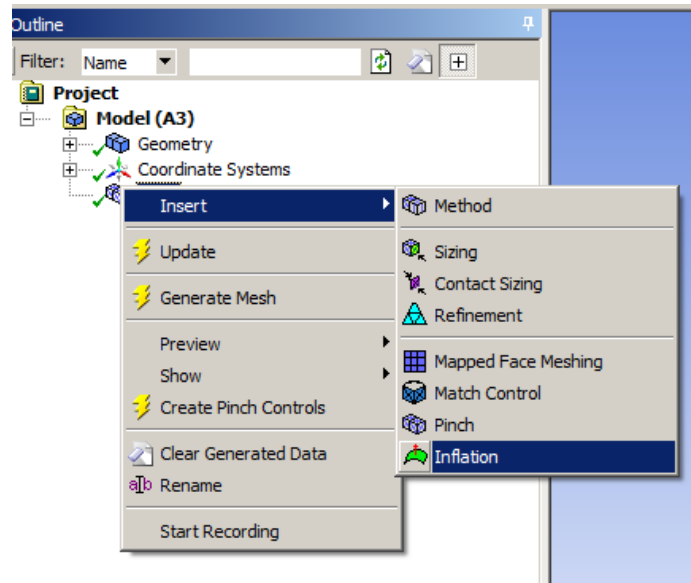


Рисунок 1.10 – Створення призматичних шарів поблизу стінки

Після вставки призматичних шарів у дереві сітки з'явиться вікно, у якому необхідно ввести параметри призматичних шарів.

Details of "Inflation" - Inflation	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	3 Faces
Inflation Option	First Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> First Aspect Ratio	12
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	12
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,4
Inflation Algorithm	Pre

Рисунок 1.11 – Параметри призматичних шарів поблизу стінки

У вкладці Geometry вибираємо тіло труби, а у вкладці Boundary – поверхні труби, що стикаються з твердими стінками. Інші параметри вибираємо такими, як показано на рис. 1.11. При цьому метод побудови вибираємо на основі першого співвідношення сторін рівного 12 для забезпечення нормальної якості побудови сітки. Кількість шарів – 12, згущення виробляється з коефіцієнтом – 1,4.

Створимо сітку із заданими параметрами та подивимось тепер на якість створеної нами сітки. Для цього в налаштуваннях сітки в розділі Statistics у пункті Mesh Metrics виберемо опцію «Quality». Сітка й графік, побудований програмою, представлений на рис. 1.12.

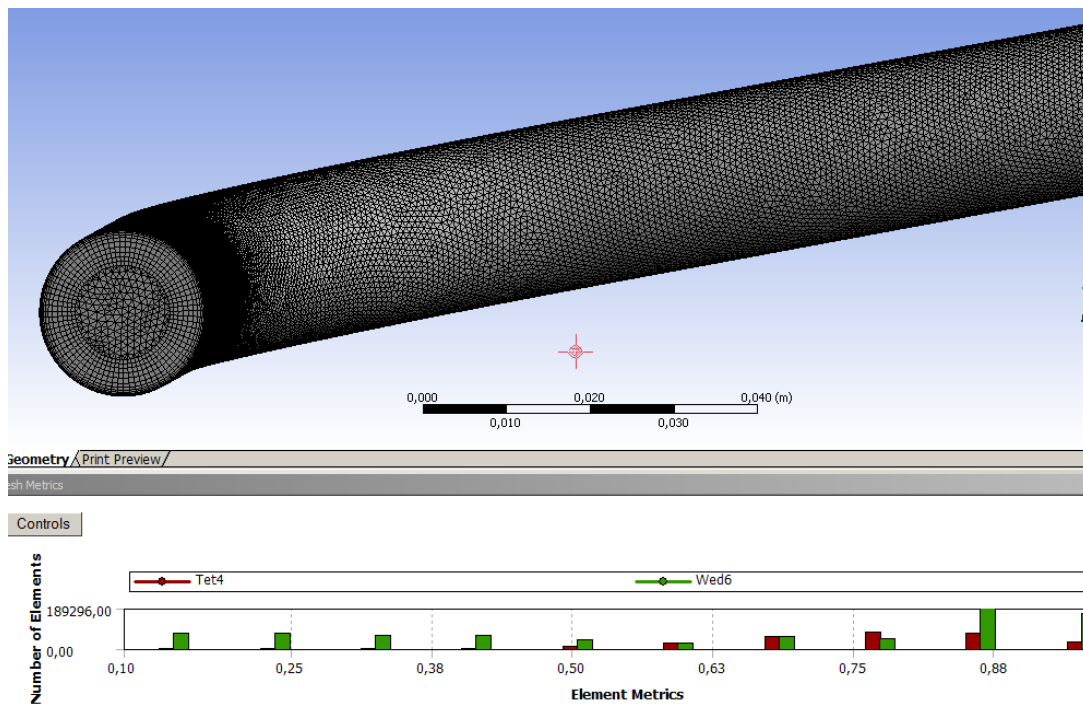


Рисунок 1.12 – Якість сітки

Як видно з рисунка, у сітці відсутні неякісні елементи (показник якості елементів повинен бути більшим за 0,1). Закриваємо сітковий редактор й у вікні Workbench переходимо до наступного етапу Setup.

1.3. Setup. При натисканні вкладки Setup з'являється вікно препроцесора (CFX-Pre), що приймає сіткову модель від генератора сіток, формує граничні умови, зокрема, інтерфейси на деяких границях, задає властивості робочого тіла (рідина, газ, суміш і т.д.), формує умови рішення задачі (стаціонарна або нестаціонарна течія), точність рішення та задає модель турбулентності, або ламінарний режим [3].

Вікно CFX-Pre показано на рис. 1.13. Всі елементи моделі тут представлені у вигляді дерева (Outline). Нові об'єкти можна додавати щикликом ПКМ в Outline. Вікно повідомлень (праворуч унизу) служить для виводу попереджень і помилок.

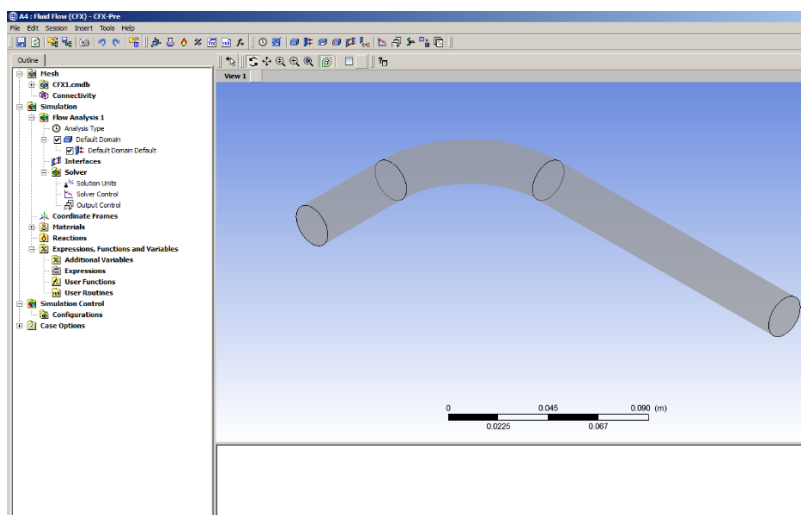


Рисунок 1.13 – Загальний вид препроцесора CFX-Pre

Після запуску CFX-Pre для всіх тривимірних об'єктів сітки автоматично створюється домен із назвою Default Domain. Для всіх двовимірних областей кожного домену автоматично створюються границі під назвою Default Domain Default. Назви можна змінити нажавши ПКМ й відповідне меню Rename.

Панель домену складається із трьох вкладок Basic Settings (основні установки), Fluid Models (моделі рідини) and Initialization (ініціалізація).

Обираємо як матеріал у вкладці Basic Settings воду – Water. У вкладці Fluid Models вибирають модель турбулентності, наприклад, обираємо Shear Stress Transport. Всі інші вкладки залишаємо без змін.

Наступний крок полягає в створенні граничних умов. Згенеруємо граничні умови входу та виходу води, а також тверді стінки. Клацніть ПКМ по домену Default Domain і виберіть Insert > Boundary. Встановите як назву

(Name) inlet, клацніть по кнопці ОК. Вибираємо в якості Boundary Type – Inlet. У вікні Basic Settings у вкладці Location потрібно вибрати поверхню входу в трубу, як це показано на рис. 1.14.

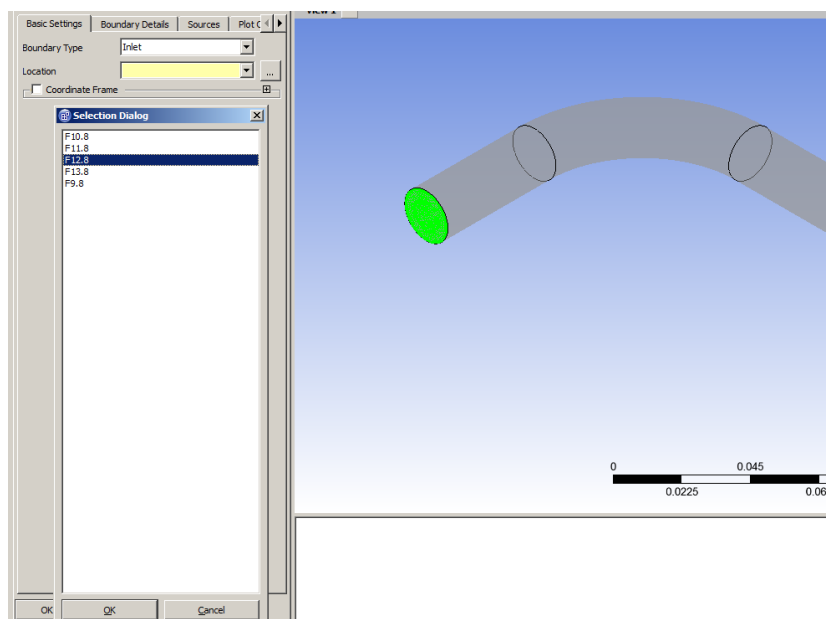


Рисунок 1.14 – Установка граничної умови

У вкладці Boundary Details > Mass And Momentum установити Option > Normal Speed = 1 м/с згідно умов завдання. Інші параметри залишити без змін.

Далі робимо аналогічну процедуру, встановлюючи границю виходу (Outlet) з параметром Average Static Pressure > Relative Pressure = 0 Pa. Вибираємо в якості Boundary Type > Outlet. Коли ми встановлюємо Relative Pressure (відносний тиск) рівним 0 [Pa] це означає, що він є відносним стосовно доменного Reference Pressure (тиск, використовуваний як основа для порівняння), що задано рівним 1 [atm].

За замовчуванням всі поверхні, які не використані при установці граничних умов одержать граничну умову – Wall (стінка), що відповідає умовам розв’язуваної нами задачі.

У закладці SolverControl задається точність виходу на стале рішення (Residual Target за умовчуванням $10e-4$), кількість ітерацій до зупинки, вибір часового кроку інтегрування системи рівнянь. У цій вкладці змінюємо тільки параметр Max. Iteration на 1000, внаслідок того, що значення встановлене за умовчуванням і рівне 100 крокам, найчастіше недостатньо щоб виконати рішення задачі із заданою точністю Residual Target. Після цього зберігаємо проект і закриваємо CFX-Pre.

1.4. Solution. Рішення виробляється вирішувачем (солвером) CFX. Солвер (CFX-Solver) приймає файл із розширенням *.def і генерує в процесі інтегрування рівнянь Нав’є-Стокса, осереднених за Рейнольдсом-Фавром й

рівнянь моделі турбулентності, файл рішення з розширенням *.res, і текстовий файл із розширенням *.out, що містить докладну інформацію про особливості рішення. Солвер також формує директорію файлів рішення, що містить допоміжні файли, файл розпаралелювання *.par, файл моніторингу *.mst й інші файли. При запуску розрахунку вирішувач на підставі граничних умов за умовчужанням формує початкове наближення до рішення завдання. За замовленням користувача солвер може приймати також один або кілька бінарних файлів з розширенням *.res для використання як початкове наближення до наступного рішення завдання. При зміні сіткової моделі вирішувач робить інтерполяцію вихідного рішення на нові вузли сітки. При завданні особливостей розрахунку у вікні Run Definition у вкладці Run Mode можна вибрати Platform MPI Local Parallel, що буде означати розпаралелювання розрахунку на кілька ядер процесора – Partions (необхідно знаком + указати число ядер, що залежить від комп'ютера, на якому виробляється розрахунок).

У процесі рішення у вікнах солвера відображається процес рішення з номерами ітерацій, збіжність нев'язань, а також, графічне відображення збіжності нев'язань за рівняннями, що інтегруються. Вирішення зупиняється за наступними подіями: а) при виявленні помилки в рішенні; б) за ініціативи користувача; в) при досягненні встановленої точності за нев'язаннями; г) при перевищенні встановленого числа кроків за часом [3, 4].

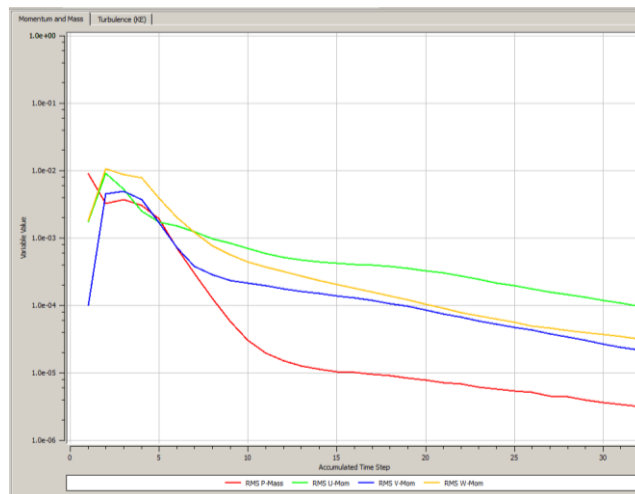


Рисунок 1.15 – Процес збіжності рішення

Успішне рішення задачі формує файл із розширенням *.res, що може бути оброблений у постпроцесорі CFX-Post.

На рис. 1.15 показаний процес збіжності рішення протягом 32 ітерацій до виходу всіх нев'язань за залишковими членами рівнянь на точність $10e-4$. У деяких випадках [6], інформативними показниками якості розрахунку є графік витрати та дисбалансу витрат між входом і виходом каналу у

відсотках, які можна додати кликнувши у вільному полі та вибравши New Monitor > imbalance > Default Domain > P-mass Imbalance (%). Інші монітори, що цікавлять, можна додати аналогічним образом використовуючи вкладку New Monitor.

1.5. Results. З появою у вікні розглянутої моделі варто ініціювати завдання площини (поверхні й т.д.) для візуалізації поля течії застосуванням команди Location>Plane>InsertPlane, у вікні вибрати метод завдання й нажати Apply. За бажанням користувача для візуалізації поля рішення може бути обрано кілька поверхонь або площин.

Візуалізація поля течії може бути представлена ізолініями (рівня), векторами швидкості, лініями току й т.д. на заздалегідь заданих площинах або поверхнях. Наприклад, побудова ізоліній починається за командою Insert Contour: у вікні, що випадає, Details Of Contour вибираються області побудови Domains, місця, на яких виконується побудова Locations, задається найменування змінної Variable, кількість ізоліній Number Of Contour, у закладці Render доступні прозорість полів Transparency, підсвічування поля Lighting й інші опції.

Командою File>Save Picture зображення на вікні View може бути збережене в робочій директорії жорсткого диска. CFX-Post серед закладок містить набір калькуляторів, з яких найбільш універсальним є Function Calculator, за допомогою якого вибирається функція Function, розташування Location. Особливістю набору функцій є можливість одержання витрати в перетині, і середніх за витратою або за площею параметрів в обраному перетині.

Далі вибираємо площини візуалізації параметра течії, наприклад, поля швидкості, ліній току, поля векторів швидкості (рис. 1.16).

У калькуляторі Function Calculator розраховуємо інтегральні параметри повного тиску, статичного тиску, швидкості, густини в перетинах входу та виходу. Щоб порахувати $P_{total\ inlet}$ необхідно перейти у вкладку Calculators, потім нажати FunctionCalculator, потім у вкладці Function вибрати areaAve (середнє за площею); у вкладці Location вибрати Inlet; у вкладці Variable – Total Pressure; потім нажати Calculate [5, 6].

Формула обчислення втрат повного тиску має вигляд

$$\zeta = (P_{total\ inlet} - P_{total\ outlet}) / (0,5\rho V_{inlet}^2).$$

Для нашого випадку отримано: $P_{total\ inlet} = 713$ Па, $P_{total\ outlet} = 506$ Па; $\zeta = 0,41$. Наявність парного вихру на виході говорить про гарний якісний збіг результатів розрахунку й експериментальних даних.

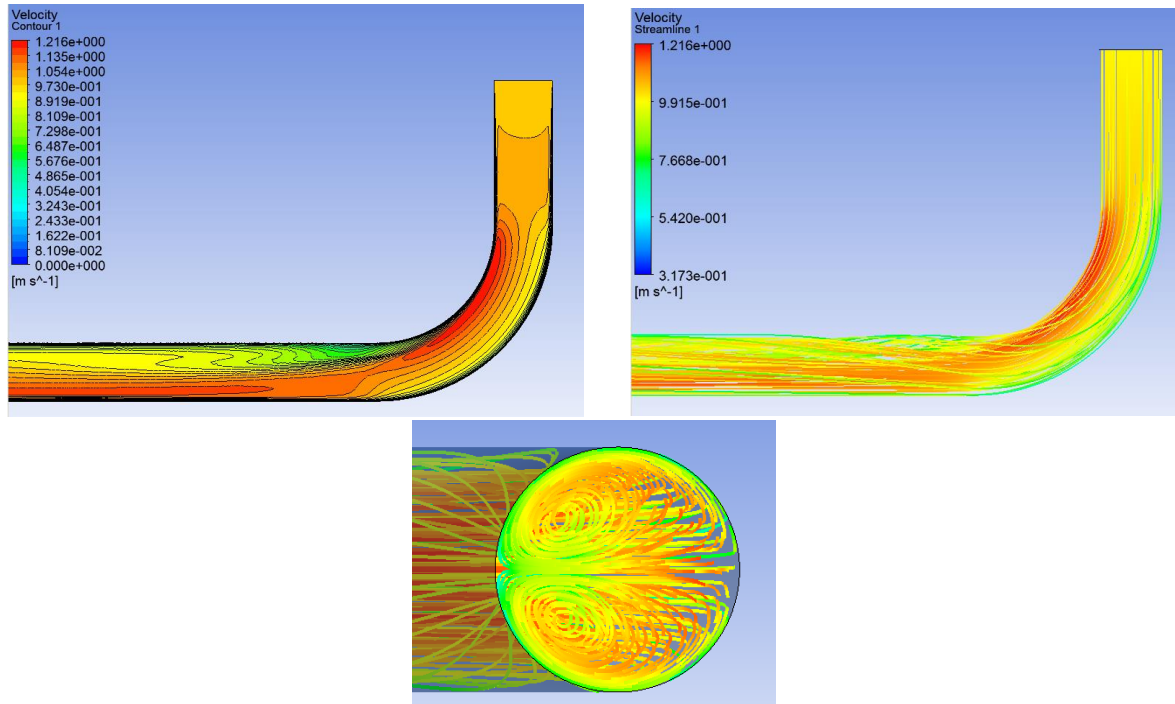


Рисунок 1.16 – Поле швидкості та лінії току в площині симетрії каналу закругленого коліна

Поля швидкості, ліній струму для коліна без закруглення показане на рис. 1.17.

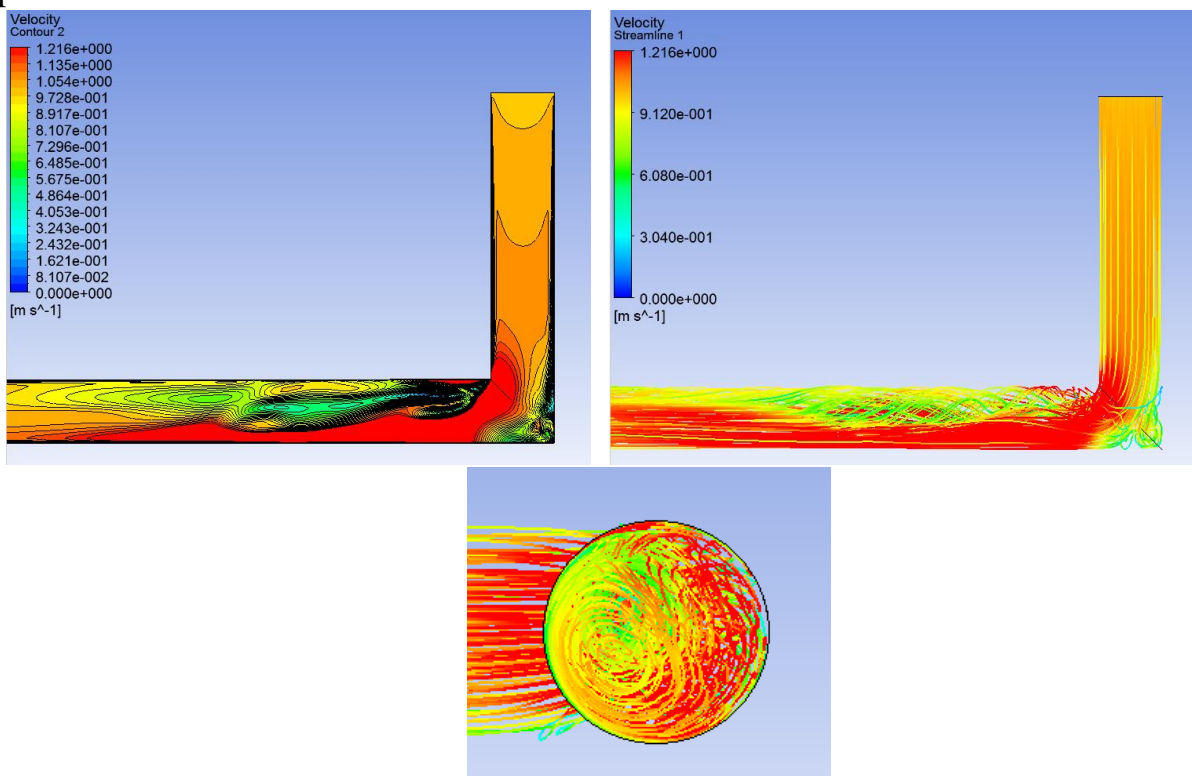


Рисунок 1.17 – Поле швидкості та лінії струму в площині симетрії коліна

Для коліна без закруглення отримано: $P_{total\ inlet} = 1371$ Па, $P_{total\ outlet} = 509$ Па; $\zeta = 1,73$. Згідно експериментальних досліджень втрати повного тиску для коліна із закругленням повинні бути в кілька разів меншими, ніж для коліна без закруглення, що підтверджує адекватність проведених розрахунків. Більші втрати повного тиску пояснюються утворенням вихрових зон й більших втрат енергії, внаслідок відривання потоку, причому ці потоку тим більші, чим більший кут повороту потоку [2].

На втрати тиску впливають кут повороту потоку, співвідношення радіусу повороту та діаметру каналу, а також форми поперечного перерізу труби [2].

Зміст звіту

Звіт має містити найменування і мету роботи, рисунки (скріншоти) геометрії, сітки, граничних умов та результатів, розрахунки коефіцієнта втрат, висновки за роботами.

Контрольні питання

1. Чи можна в Ansys використовувати геометричну модель, що побудовано в SolidWorks, 3D Max? Чи обов'язково будувати геометрію в Ansys?
2. Яку саме геометрію необхідно побудувати для розрахунків течії рідини та газу: стінок чи порожнин, в яких знаходиться рідина?
3. Навіщо контролювати якість сітки?
4. Чи можна не задавати граничні умови і відразу після побудови сітки перейти до розрахунку?
5. Чи можна передивитися результати розрахунку в іншій програмі, чи лише тільки в Ansys?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. МЕТОДИ ПОБУДОВИ СІТОК

Мета роботи: знайомство з методами побудови сіток, що доступні в програмному модулі Ansys Meshing для використання їх в числовому аналізі течії рідини в проточних частинах гідравлічних машин.

Ця лабораторна робота присвячена виключно побудові сіток й в ній розрахунок течії здійснюватися не буде. Для побудови сіток необхідно використати вже підготовлений файл геометрії, який необхідно отримати у викладача – рис. 3.1.

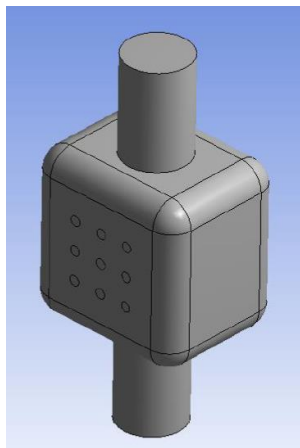


Рисунок 3.1 – Геометрія, для якої необхідно побудувати сітку

1. Глобальні налаштування параметрів сітки. На першому етапі необхідно налаштувати, яка саме програма буде використовувати сітку, що буде побудована. Зауважте, що в залежності від того, який саме програмний продукт буде обрано, буде залежати які види сітки доступні до побудови. Наприклад, AnsysCFX не працює з полігональними сітками, але Fluent – працює. Тому, якщо обрати в налаштуваннях Fluent, це дозволить побудувати сітку з полігональними елементами (Рис. 3.2).

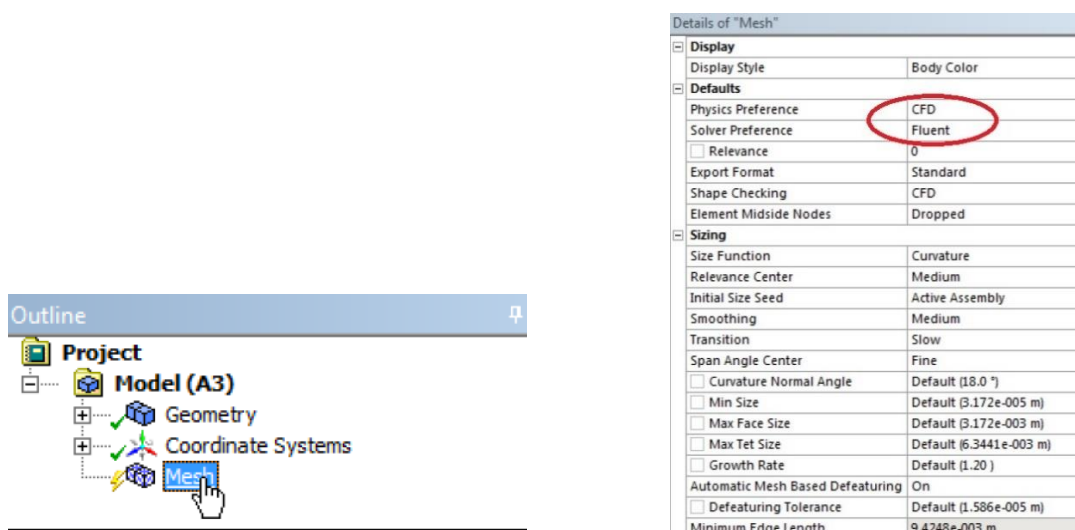


Рисунок 3.2 – Налаштування програми, що буде використовувати сітки

Перш за все, необхідно обрати як напрямок майбутнього розрахунку (Physics Preference) – CFD (обчислювальна гідродинаміка), що означатиме, що сітка будується саме для розрахунку течії рідини та газу. Далі для вибору програми-вирішувача (Solver Preference) обираємо FLUENT, що дозволить дослідити більшу гамму методів побудови сіток [7, 8].

2. Назви поверхонь. Цей етап не є обов'язковим для виконання розрахунків, але є дуже доцільним для складних геометрій (Рис. 3.3). Для виконання числового розрахунку течії рідин необхідно задати граничні умови на усіх (без виключення) поверхнях. Під час побудови сітки, усім поверхням буде привласнено номер, що не є зручним під час створення граничних умов та перегляду результатів розрахунку.

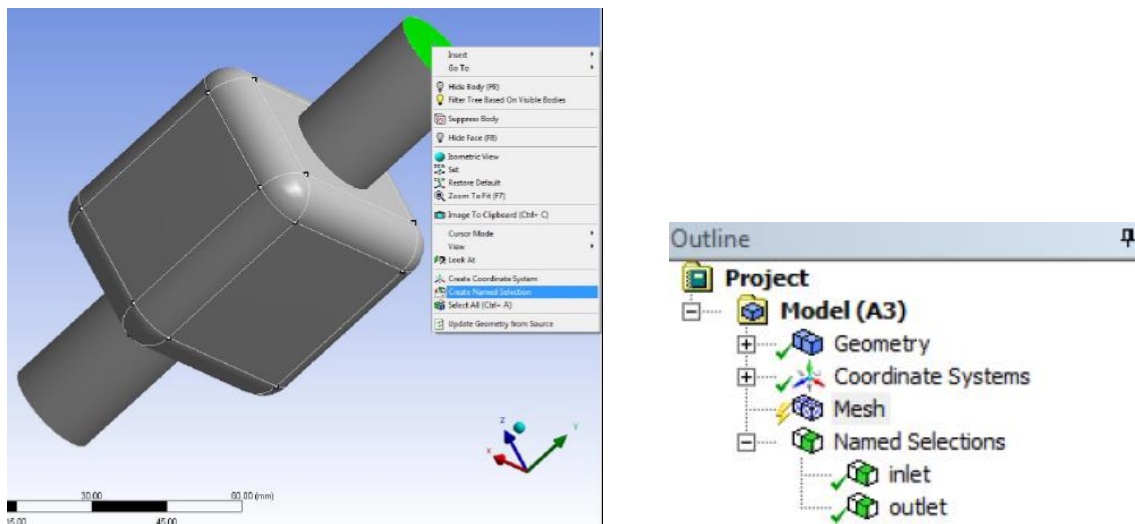


Рисунок 3.3 – Надання назв поверхням

Для того, щоб надати поверхні назву (рис. 3.3) її потрібно виділити мишкою та натиснути правою кнопкою (ПКМ) після чого з'явиться контекстне меню з параметром Create Named Selection. Натискаємо на нього й даємо назви. Наприклад, Inlet, Outlet, Wall та ін. Назви повинні бути лише латинськими буквами! В даній лабораторній роботі необхідно дати назви лише двом торцевим поверхням: зверху – Inlet (Рис. 3.3) та знизу – Outlet.

3. Створення призматичного шару за глобальними налаштуваннями. Створення призматичного пристінного шару не є обов'язковою умовою побудови сіток. Але, згідно з загальних рекомендацій необхідно подрібнювати сітки в зонах з великими градієнтами зміни фізичних величин. Для течії рідин та газів такими зонами є області поблизу твердих стінок через зміну швидкості від нуля на стінці до максимальної в центрі потоку. Тому, саме поблизу стінок відбувається збільшення швидкості з великим градієнтом. Якщо розмір елемента сітки, буде достатньо великим біля стінки, це не дозволить якісно розрахувати профіль швидкості та течію в цілому. Цей етап не є обов'язком за використання

моделей турбулентності з автоматичною генерацією пристінних функцій, тому що незалежно від кількості елементів у пристінному шарі, профіль швидкості буде згенеровано автоматично за певними формулами.

В програмному модулі Ansys Meshing є декілька шляхів побудови пристінного призматичного шару: глобальні налаштування або вибір окремих поверхонь з налаштуваннями параметрів для кожної.

Для глобальних налаштувань шару необхідно знайти у вкладці Mesh вкладку Inflation (Рис. 3.4). Змінити параметри Use Automatic Inflation на Program Controlled, що дозволить застосувати глобальні налаштування для сітки. Причому, для поверхонь з назвами призматичний шар будуватися не буде. Тобто, це означає, що якщо надано назви поверхням, то за умови Program Controlled, поверхні без назв вважаються стінками, на яких треба побудувати пристінний шар.

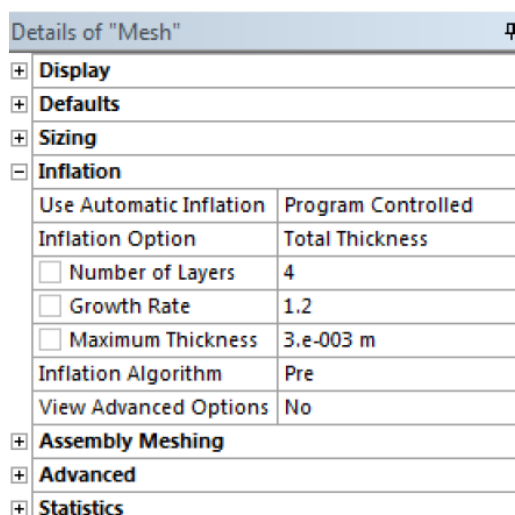


Рисунок 3.4 – Глобальні налаштування призматичного шару біля стінок

Якщо обрати налаштування All Faces in Chosen Named Selection, то можна обрати на яких саме поверхнях будувати пристінний шар, та які саме поверхні вважати стінками. Для налаштування пристінного шару необхідно обрати наступні параметри (рис. 3.4): Inflation Option – Total Thickness (пристінний шар буде будуватися розміром, що задасть користувач), Number of Layers (Кількість шарів), Growth Rate (співвідношення лінійного розміру чотирикутника наступного шару до попереднього), Maximum Thickness (Загальна товщина побудованого пристінного призматичного шару).

Результат побудови сітки наведено на рис. 3.5. Зверніть увагу на дві області, виділені червоним кольором. Зверху видно, що побудовано пристінний шар, з кількістю шарів – 4. В середині видно подрібнення сітки на елементах геометрії там де присутні лінії геометрії, але не надано назв.

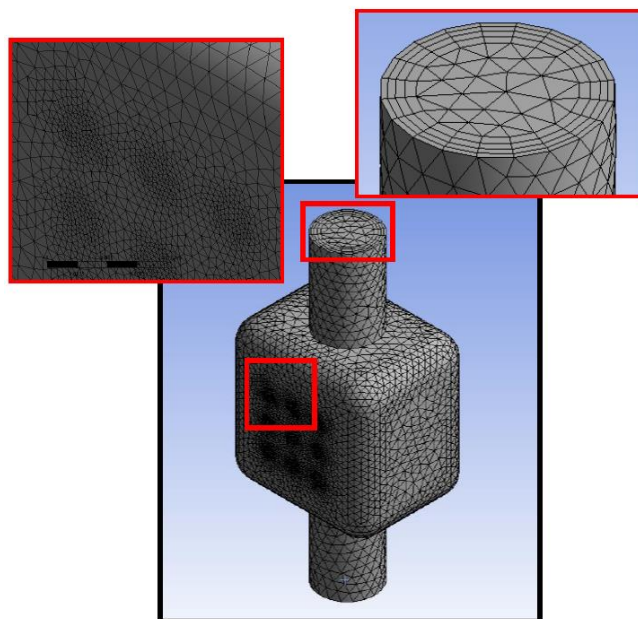
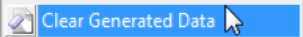


Рисунок 3.5 – Результат побудови сітки за глобальним налаштуваннями пристінного шару

Автоматичний метод за замовчуванням завжди використовує Patch Conforming Tetrahedrons та/або Sweep, залежно від того, чи геометрія піддається використанню Sweep, чи ні; у цьому випадку було використано лише Patch Conforming Tetrahedrons.

4. Налаштування методу побудови сітки. Якщо метод, що було використано за замовчуванням не задовольняє, необхідно його налаштувати окремо (Рис. 3.6). Перед тим як це зробити необхідно стерти інформацію про побудову попередньої сітки за допомогою кнопки . Клацніть ПКМ на об'єкті Mesh і виберіть пункт «Outline and select Clear Generated Data».

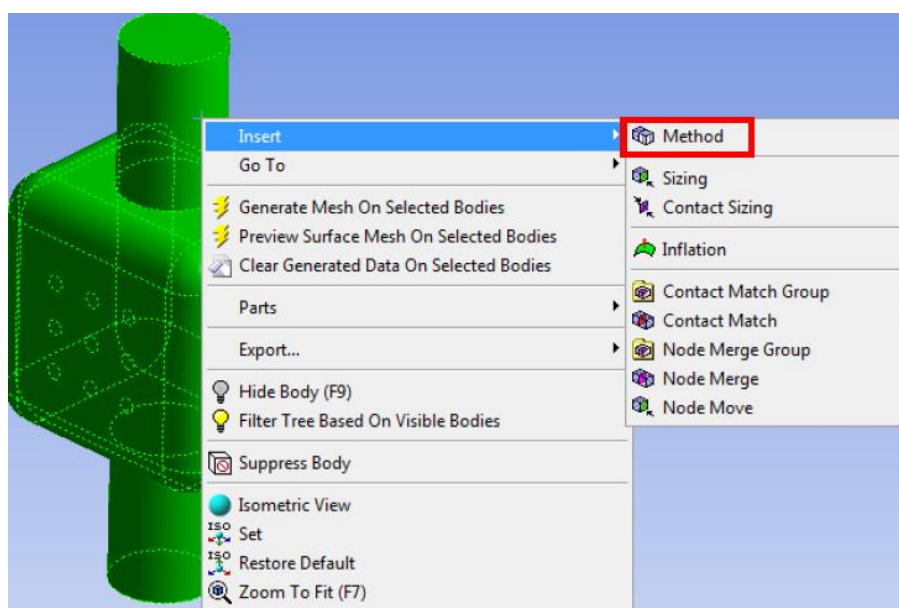



Рисунок 3.6 – Налаштування методу для побудови сітки

Для вибору усього тіла для налаштування сітки корисно використати фільтр вибору об'єктів . Після вибору методу у дереві побудови з'явиться «Автоматичний метод» (Рис. 3.7). Автоматичний метод в точності відповідає тому методу, що використовувався у попередній сітці. Тому, цього разу оберіть «Tetrahedrons» з налаштуваннями, що показано на рис. 3.8.

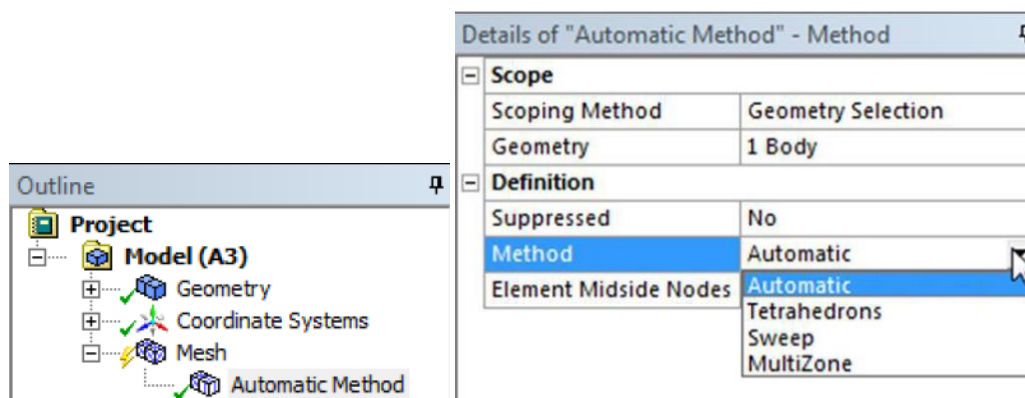


Рисунок 3.7 – Налаштування методу для побудови сітки

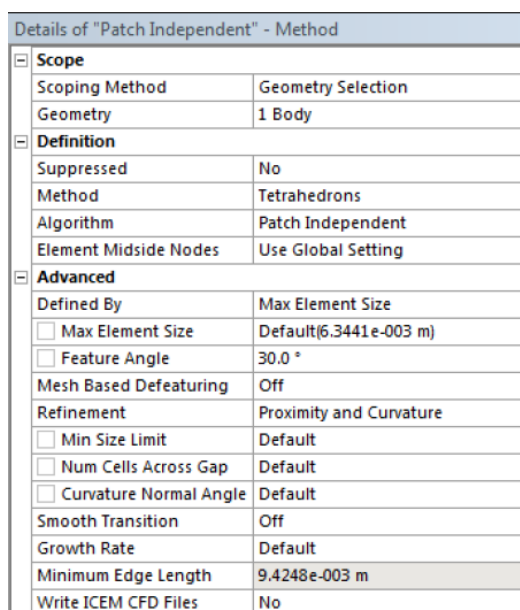


Рисунок 3.8 – Налаштування методу «Tetrahedrons»

Якщо вибрано параметр «Patch Independent», з'являється низка специфічних параметрів Patch Independent, які керують розміром елемента та особливостями побудови сітки. Ці параметри можна залишити за замовчуванням. Згенеруйте сітку натисканням кнопки з блискавкою. Результат представлено на рис. 3.9.

Алгоритм «Patch Independent» використовує інший специфічний тип побудови подрібнення (Post), про що може свідчити вікно повідомлення разом із попередженням щодо роздільної здатності сітки. Ви також могли помітити, що генерація сітки займає більше часу.

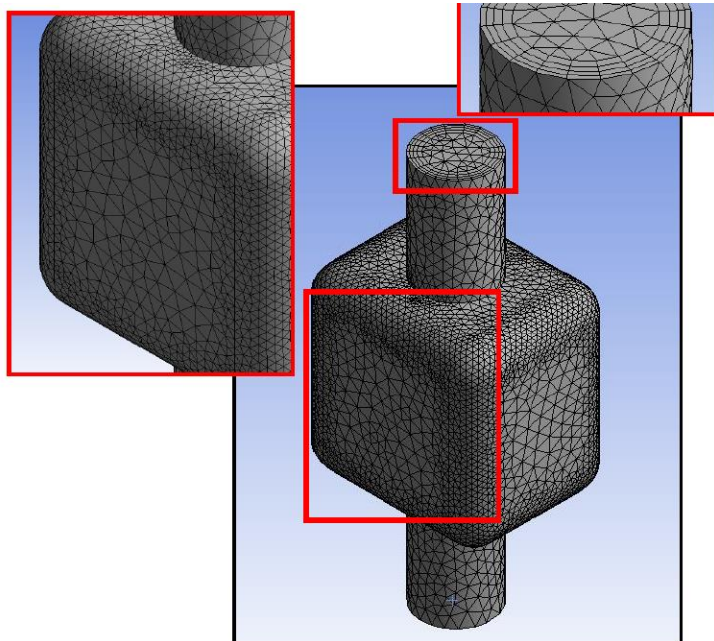


Рисунок 3.9 – Результат побудови сітки за методом «Tetrahedrons»

Зверніть увагу на автоматичне зникнення подрібнення біля кіл, що були на поверхні (рис. 3.5). Така поведінка може бути корисною для приховування деяких геометричних об'єктів великих CAD-моделей.

5. Налаштування методу «MultiZone». Оберіть у дереві побудови метод та змініть його на «MultiZone» у налаштуваннях, що з'являться для цього методу (рис. 3.10) встановіть для Free Mesh Type «Tetra/Pyramid». Згенеруйте сітку. Результат представлений на рис. 3.11.

Details of "MultiZone" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled
Free Mesh Type	Tetra/Pyramid
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Automatic
Source Scoping Method	Program Controlled
Source	Program Controlled
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default
[-] Advanced	
Preserve Boundaries	Protected
Mesh Based Defeaturing	Off
Minimum Edge Length	9.4248e-003 m
Write ICEM CFD Files	No

Рисунок 3.10 – Налаштування методу «MultiZone»

MultiZone згенерував чотирикутники на усіх поверхнях. Зверніть увагу знову на автоматичне зникнення подрібнення біля кіл, що були на поверхні (рис. 3.11).

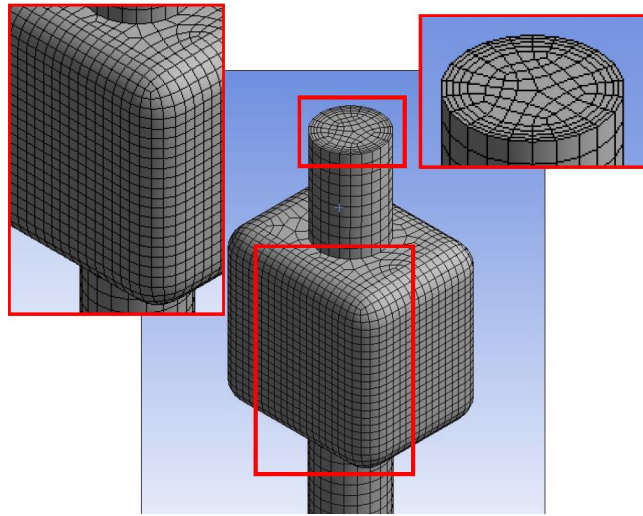


Рисунок 3.11 – Результат побудови сітки за методом «MultiZone»

Розріжте геометрію сітки і подивіться на особливості побудови пристінних шарів (Рис. 3.12). Сітка розділена на блоки, які, де можливо, заповнені гексагональними елементами. У решті областей областях створені піраміди або тетраедри згідно з нашими налаштуваннями.

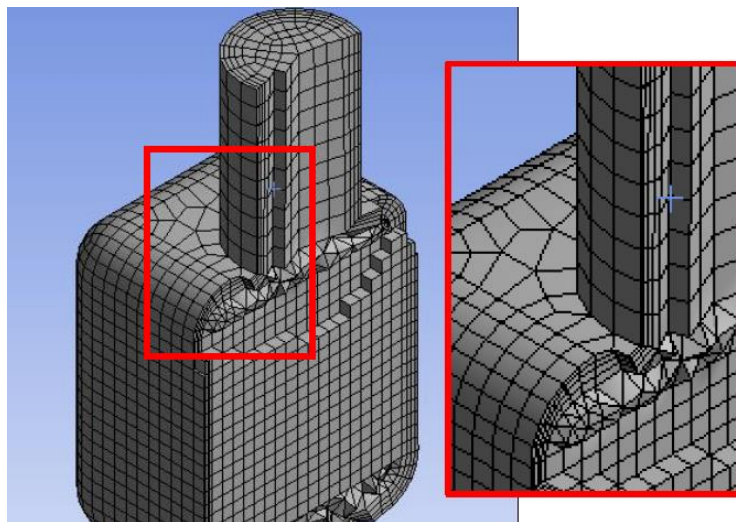


Рисунок 3.12 – Гексагональні елементи сітки за методом «MultiZone»

Наявність у сітці тетраедрів та пірамід не дозволяє вважати цю сітку гексагональною.

6. Побудова гексагональної сітки за методом «Sweep». Метод протягування «Sweep» може створювати високоякісні гексагональні сітки. Для того, щоб згенерувати таку сітку, ми повинні мати тіла, що підтримують такий метод – циліндри. Для ілюстрації методу розгортки ми розіб'ємо геометрію у програмі створення геометрії DesignModeler.

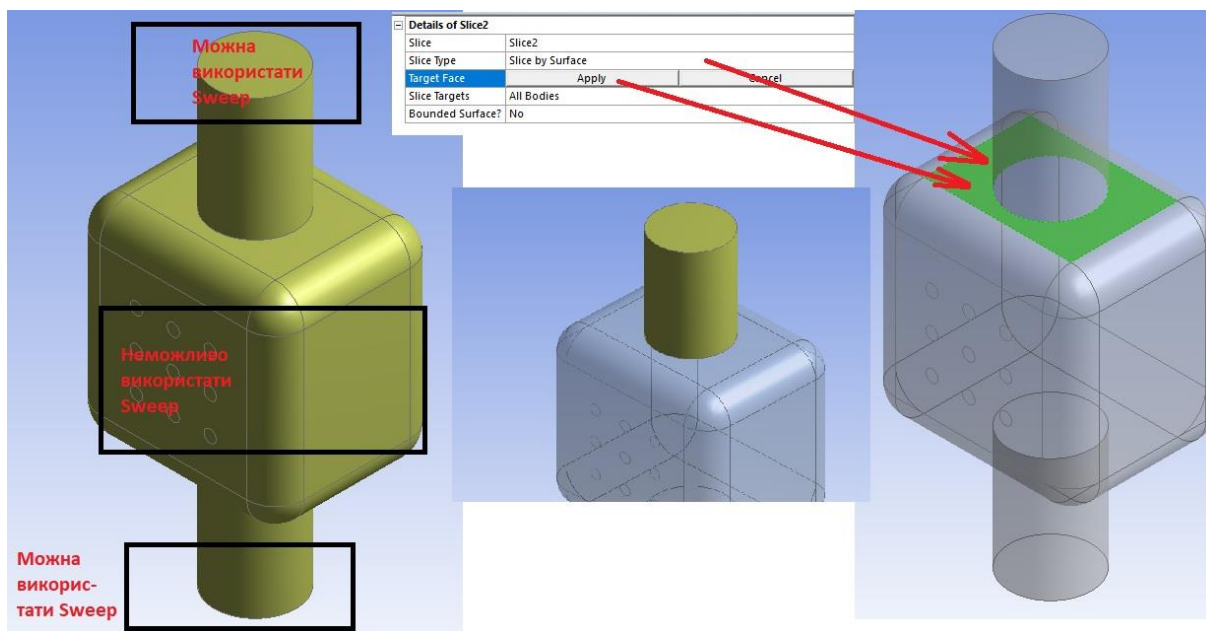


Рисунок 3.13 – Розділення тіла на декілька тіл за допомогою інструменту «Slice»

Розріжте геометрію та розкладіть її на тіла (Рис 3.13), що дозволяють використовувати «Sweep» та ні. Застосуйте процедуру «Slice» двічі для циліндра зверху та знизу. Після цього ми можемо залишити програму побудови геометрії та перейти до програми побудови сіток.

Оскільки ми змінили геометрію і параметри налаштувань попереднього методу вже не можуть використатися програма за замовчуванням перейде до налаштувань автоматичного методу.

Використайте двічі «Sweep» для циліндрів зверху та знизу за налаштуваннями, що показано на рис. 3.14. Поверхня-джерело (Source) на рис. 3.14 показана червоним кольором. Після розділення геометрії у нас тепер три тіла й сітку для них треба налаштовувати окремо. В іншому випадку для усіх трьох тіл буде використано налаштування за замовчуванням.

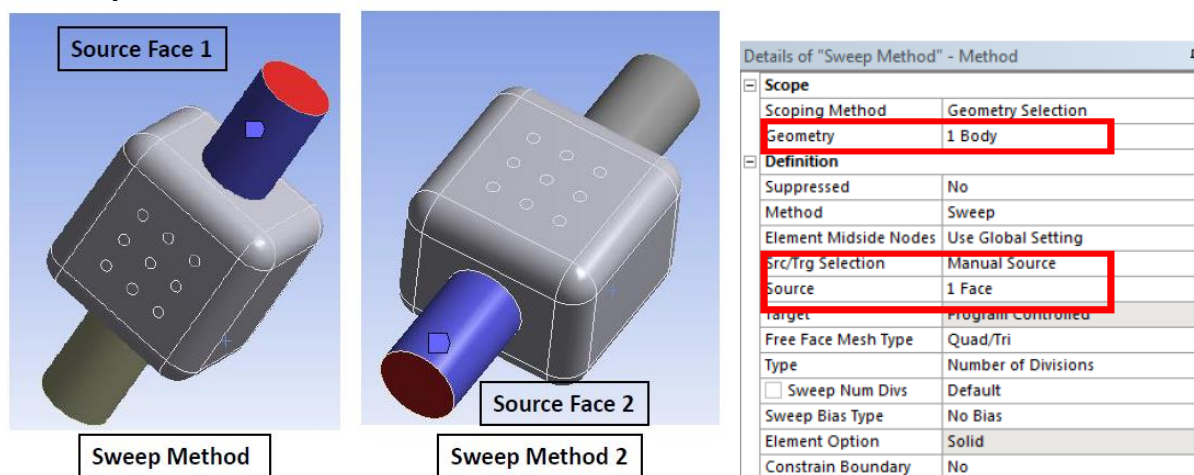


Рисунок 3.14 – Налаштування методу «Sweep»

Глобальні налаштування призматичного пристінного шару, що ми налаштували раніше не сумісні з сіткою за методом «Sweep», тому ми маємо створити локальний пристінний шар. Виділіть дві грані, як показано на рис. 3.15, клацніть ПКМП та виберіть Вставити Inflation з контекстного меню.

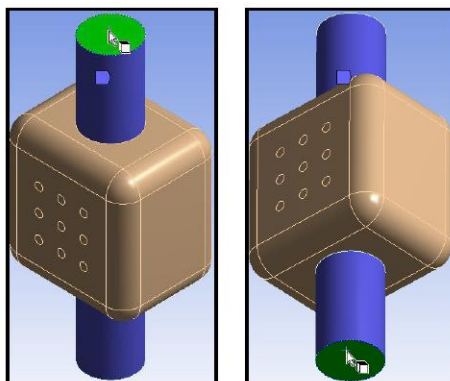


Рисунок 3.15 – Вибір граней для налаштування пристінного шару

Програма зробить витягування пристінного шару з граничних ребер цих граней і розглядатиме їх як вихідні грані для витягування. У розділі деталі «Inflation» активуйте «Boundary Selection Box», виберіть два ребра, що обмежують кожную з вихідних граней, як показано на рис. 3.16, і застосуйте виділення.

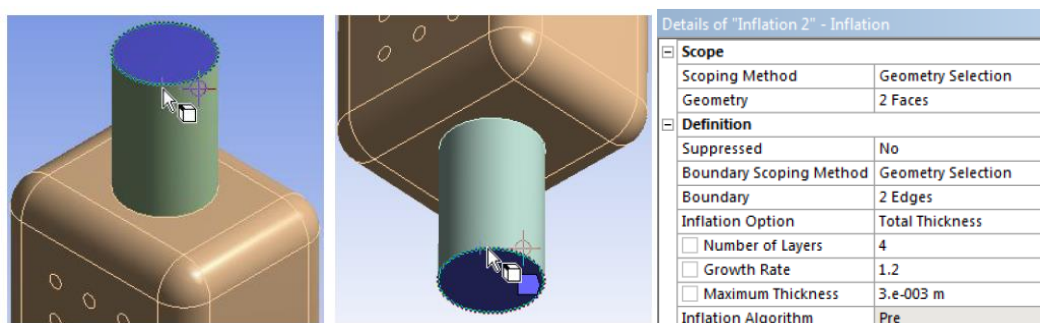


Рисунок 3.16 – Налаштування пристінного шару для методу «Sweep»

Таким чином зроблено подрібнення сітки для двох тіл з трьох. Залишилося центральне тіло без пристінного шару. Для локального налаштування та вибору стінок для подрібнення оберіть усі поверхні, які будуть мати граничну умову «стінка – Wall» під час розрахунку течії рідини та налаштуйте так, як показано на рис. 3.17.

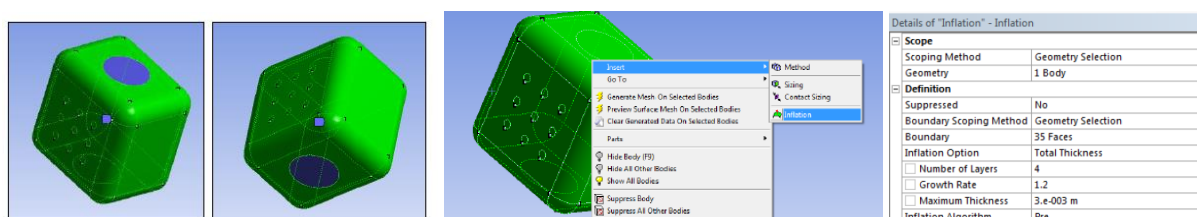


Рисунок 3.17 – Налаштування пристінного шару для центрального тіла

Ви можете виділити всі грані видимого тіла за допомогою поєднання клавіш Ctrl+A і зняти виділення з двох непотрібних круглих граней (рис. 3.17). Глобальне подрібнення, що використовується в центральному тілі "сходинок" спускається до межі розділу між тілами (ви побачите повідомлення, що вказує на це). Ви також можете вибрати верхню та нижню круглі грані торців камери, щоб уникнути сходинок як видно на рис. 3.18 праворуч.

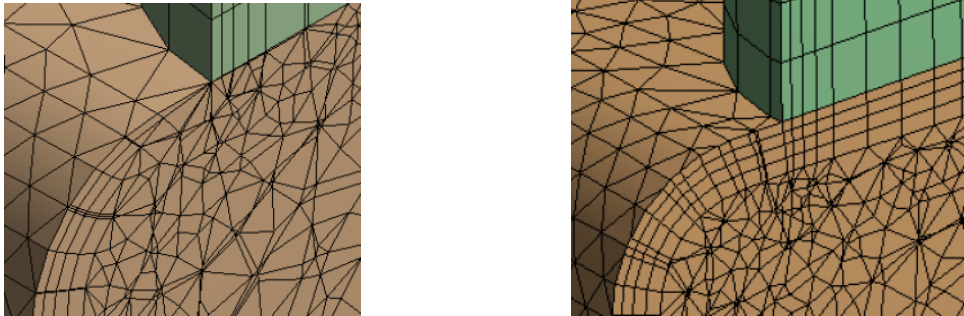


Рисунок 3.18 – Поява сходинок на границі переходу пристінного шару

Відсутність сходинок забезпечується завданням усіх бокових поверхонь центрального тіла як стінок.

Зміст звіту

Звіт має містити найменування і мету роботи, рисунки (скріншоти) геометрії та сіток, що побудовано різними методами, висновки.

Контрольні питання

1. Навіщо необхідно використовувати сітку для числового розрахунку течії рідини?
2. Чи можна використовувати сітку, що побудовано в інших програмах побудови сіток?
3. Чому вважається, що гексагональна сітка краще ніж тетрагональна?
4. Навіщо подрібнювати сітку біля стінок?
5. Якими фігурами є пристінні елементи, якщо ядро сітки складене з гексагональних елементів? Тетрагональних елементів?

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 4-5. РОЗРАХУНОК ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛОТИ ВІД ГАЗУ ДО ВОДИ ЧЕРЕЗ ТВЕРДІ СТІНКИ ТРУБИ

Мета роботи: знайомство з розрахунками теплопередачі та використанням декількох тіл/доменів, й налаштуванням взаємодії між ними.

Необхідно зробити розрахунок передачі тепла від газу з температурою $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до води, що протікає в трубці із внутрішнім діаметром 10 мм . Визначити середню температуру води на виході із трубки, якщо на вході в трубку вода мала температуру $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахункова схема наведена на рис. 4.1. Зовнішній діаметр трубки 12 мм , довжина – 300 мм .

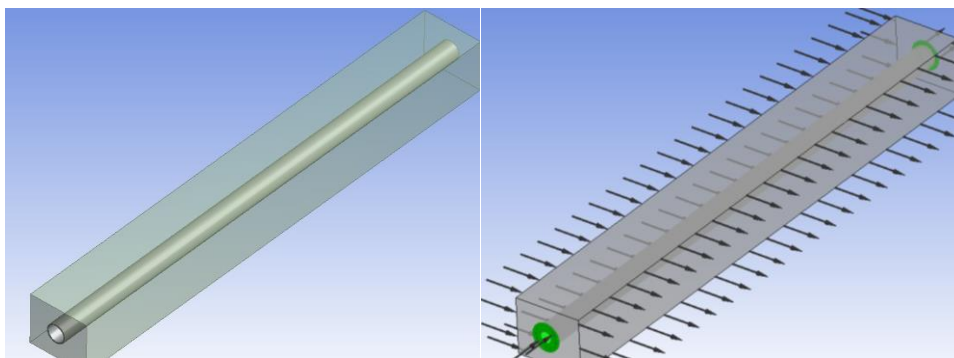


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема теплопередачі

Тому що для рішення даного завдання необхідно розраховувати течію рідин і газів, то будемо використати компонент «Fluid Flow (CFX)», у якому є можливість завдання граничних умов і розрахунку теплопередачі.

1. «Geometry». У ході розрахунку теплопередачі, нас цікавлять особливості течії газу, що обтікає трубку й води, що нагрівається від газу, тому, геометрію й сітку, будуємо тільки для «рідкого і газового» об'ємів.

Побудова моделі починається з вибору в дереві побудови площини XY, після чого на панелі інструментів натискаємо кнопку «New sketch». Для рисування ескізу поперечного перерізу трубки використаємо інструмент Circle (окружність). Будуємо дві концентричні окружності радіусами $10\text{ та }12\text{ мм}$. У результаті одержуємо ескіз, показаний на рис. 4.2.

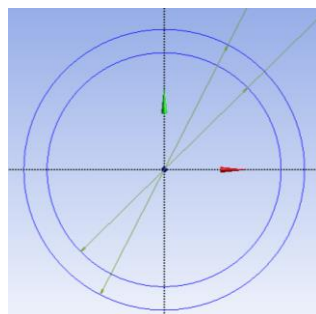
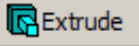



Рисунок 4.2 – Ескіз поперечного перерізу трубки

Для побудови області руху рідини скористаємося операцією видавлювання . У вікні «Details view» залишаємо більшість параметрів без змін крім Depth – довжина, на яку буде здійснюватися видавлювання. Значення вводиться вручну – 300 мм.

Далі виділяємо одну з поверхонь входу або виходу трубки й натискаємо на іконку “New Plane” (). У новій площині будуємо ескіз у вигляді прямокутника для вказівки області течії газу. Розміри прямокутника – 60 на 80 мм. Ескіз показаний на рис. 4.3.

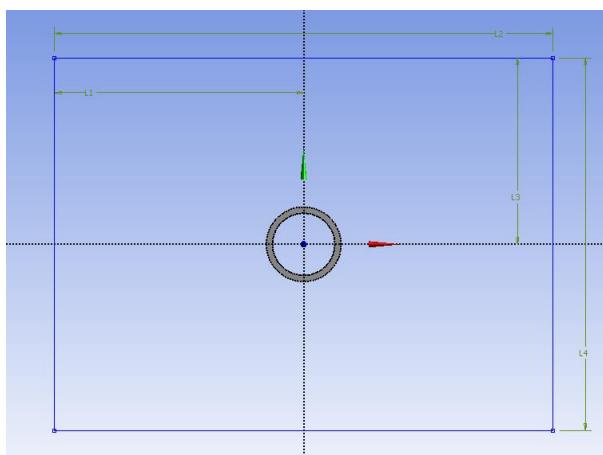
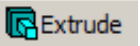

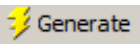


Рисунок 4.3 – Ескіз області течії нагрітого газу

Для побудови області газу скористаємося операцією видавлювання . У вікні «Details view» залишаємо більшість параметрів без змін крім Depth – довжина, на яку буде здійснюватися видавлювання. Значення вводиться вручну – 300 мм. При виборі параметра Operation вибираємо Add Frozen для того, щоб відбулася геометрична розбивка області течії рідини від області течії газу.

Як було сказано раніше тверде тіло трубки необхідно представити у вигляді «порожнини» в рідкому об’ємі. Для цього використаємо операцію Enclosure (Додаток)  Enclosure. У параметрах цієї операції вказуємо в якості Shape – User Defined, User Defined Body – указуємо мишкою на область паралелепіпеда газу. Після чого натискаємо піктограму  Generate для генерації твердих тел. У результаті одержуємо три твердих тіла: рідке тіло руху води в трубці, тверде тіло самої трубки й рідке тіло руху газу (Рис. 4.4). Далі зберігаємо проект і закриваємо Ansys Design Modeler.

2. Mesh. У даній задачі потрібно побудувати три області призматичних шарів: для течії рідини в трубці, на внутрішній поверхні трубки й для обтікання газом твердої стінки – на зовнішній поверхні трубки;

третя область призматичних шарів перебуває на зовнішніх стінках області течії газу.

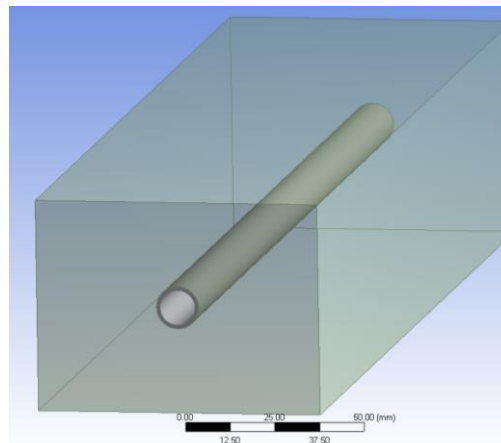


Рисунок 4.4 – Остаточний результат побудови твердих тіл

Створимо сітку із заданими параметрами й подивимося тепер на якість створеної нами сітки. Для цього в налаштуваннях сітки в розділі Statistics у пункті Mesh Metrics виберемо опцію «Quality». Сітка, побудована програмою, представлена на рис. 4.5.

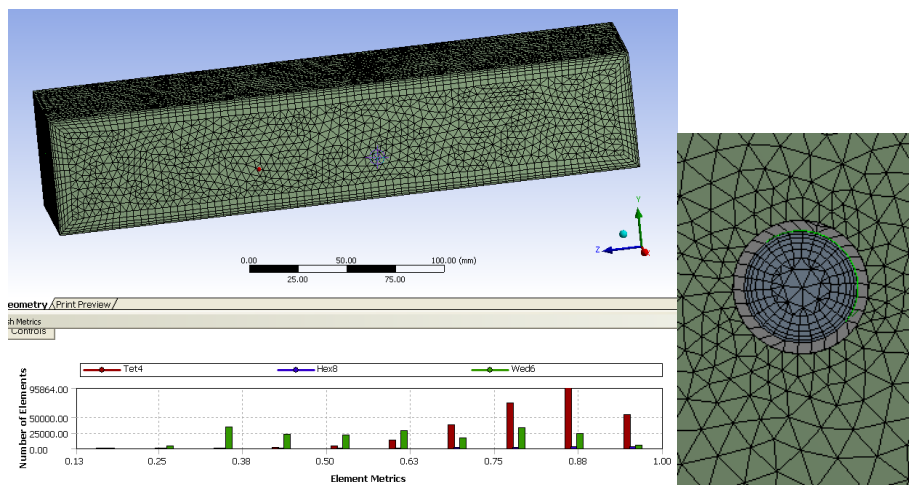


Рисунок 4.5 – Якість сітки

Як видно з рисунка, у сітці відсутні неякісні елементи (показник якості елементів перевищує 0,1). Закриваємо сітковий редактор та у вікні Workbench переходимо до наступного етапу Setup.

3. Setup. Після запуску CFX-Pre із всіх тривимірних об'єктів сітки автоматично створюється домен за назвою Default Domain. Із всіх двовимірних областей для кожного домену автоматично створюються границі під назву Default Domain Default. У нашому завданні існують три різних області: область руху води, газу й тверде тіло трубки. Тому розділимо ці області шляхом додавання відповідних доменів: Water, Gas, Solid (рис. 4.6).

При редагуванні доменів необхідно вказати відповідні кожному з доменів параметри. Для домену Water у вкладці Basic Settings воду – Cold Water (видалити Fluid1 та створити новий матеріал Water). У вкладці Fluid Models вибирають модель турбулентності, наприклад, виберемо Shear Stress Transport і у вкладці Heat Transfer указують Thermal Energy (рис. 4.7). Параметр Domain Type для рідких доменів (вода й газ) указуємо – Fluid Domain. Всі інші вкладки залишаємо без змін [9].

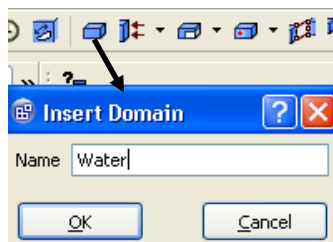


Рисунок 4.6 – Додавання домену

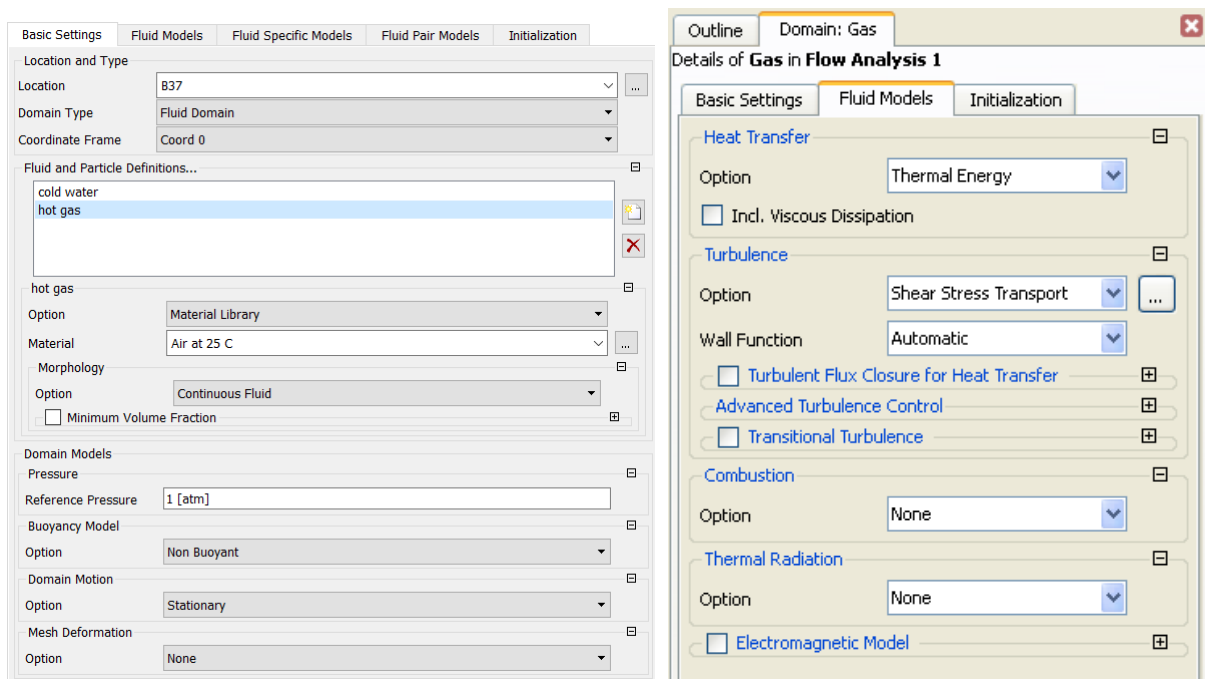


Рисунок 4.7 – Редагування параметрів домену

Для домену Gas у вкладці Basic Settings створюємо новий матеріал, наприклад, hot gas й вибираємо газ – Air at 25 C. У вкладці Fluid Models вибирають модель турбулентності, наприклад, виберемо Shear Stress Transport і у вкладці Heat Transfer указують Thermal Energy (рис. 4.7). Всі інші вкладки залишаємо без змін.

Для домену Solid у вкладці Basic Settings вибираємо матеріал трубки – Copper (Мідь). У вкладці Solid Models вибирають у вкладці Heat Transfer – Thermal Energy. Всі інші вкладки залишаємо без змін.

Наступний крок полягає в створенні граничних умов. Для домену води створюємо граничні умови входу й виходу на поверхнях, показаних на рис. 4.8. Виберіть Insert > Boundary. В якості назви вказуємо inlet. Вибираємо в якості Boundary Type – Inlet. У вікні Basic Settings у вкладці Location потрібно вибрати поверхню входу в трубу. У вкладці Boundary Details > Mass And Momentum установити Option > Total Pressure (stable) = 2500 Pa, Total Temperature = 15 C. Інші параметри залишити без змін [10]. Тому що створено дві рідини Cold Water та Hot Gas, це вимагає під час завдання граничних умов входу переходити на вкладку Fluid Values та налаштовувати Volume Fraction. Для газового домену: Cold Water Volume Fraction = 0, Hot Gas Volume Fraction = 1, для рідинного домену зворотно: Cold Water Volume Fraction = 1, Hot Gas Volume Fraction = 0. Крім того, треба в налаштуваннях домену вказати у вкладці Fluid Pair Models число Нусельта. Наприклад, для цього прикладу 10.

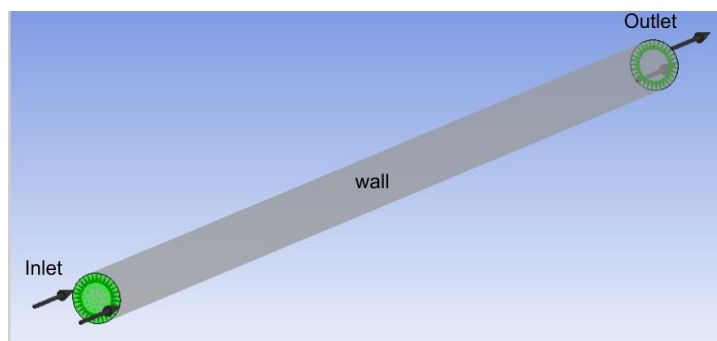


Рисунок 4.8 – Установка граничних умов в трубі

Установлюємо границю виходу (Outlet) з параметром Average Static Pressure > Relative Pressure = 0 Pa. Вибираємо в якості Boundary Type – Outlet.

За умовчужанням всі поверхні, які не використані при установці граничних умов одержать граничну умову – Wall (стінка), що відповідає умовам розв’язуваної нами задачі.

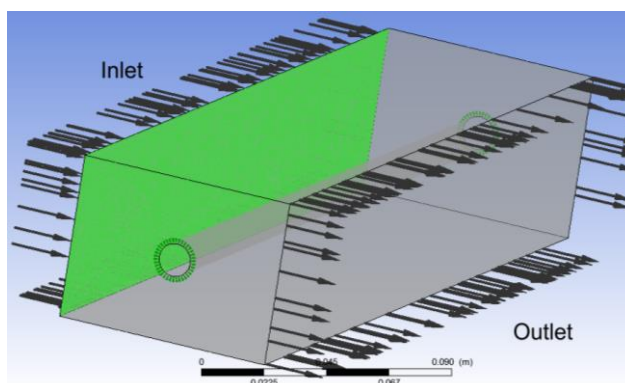


Рисунок 4.9 – Установка граничних умов у газовому домені

Для домену газу створюємо граничні умови входу й виходу на поверхнях, показаних на рис. 4.9. Виберіть Insert > Boundary. Установите в якості назви inlet_gas, клацніть по кнопці ОК. Вибираємо в якості Boundary Type – Inlet. У вікні Basic Settings у вкладці Location потрібно вибрати поверхню входу в трубу. У вкладці Boundary Details > Mass And Momentum установити Option > Total Pressure (stable) = 5000 Pa, Total Temperature = 120 C. Інші параметри залишити без змін.

Установлюємо границю виходу (Outlet_gas) з параметром Average Static Pressure > Relative Pressure = 0 Pa. Вибираємо в якості Boundary Type – Outlet.

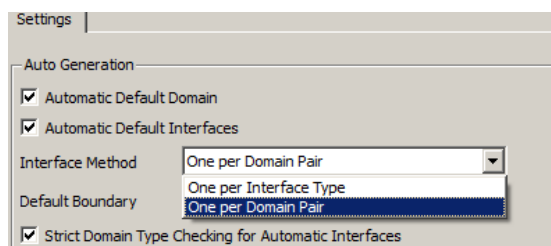


Рисунок 4.10 – Створення поверхонь взаємодії доменів

Далі необхідно визначити особливості взаємодії доменів між собою. Для цього потрібно змінити параметри вкладки Case Options – General (Рис. 4.10) з параметра Interface Method – One Per Interface Type на One Per Domain Pair. Що дозволить в автоматичному режимі створити поверхні взаємодії кожної пари доменів між собою. У результаті в дереві моделі з'явилося у вкладці Interface дві поверхні: поверхня розділу між газом і твердою стінкою трубки й поверхня розділу між водою, що протікає в трубці, та твердою трубкою. Увійшовши в кожну із вкладок необхідно вказати особливості взаємодії доменів. Наприклад, налаштуємо взаємодію доменів газу (Gas) і твердої стінки (Solid). У вкладці Interface Side 1 вказуємо домен Gas та Region List – поверхня, що прилягає до твердої стінки (див. рис. 4.11).

Потім, у вкладці Interface Side 2 вказуємо домен Solid та Region List – поверхня, що прилягає до газового домену. У вкладці Additional Interface Models вказуємо на необхідність розрахунку передачі тепла – ставимо покажчик Heat Transfer. Інші параметри залишаємо без змін.

Потім аналогічну процедуру виконуємо для налаштування взаємодії домену води та твердої стінки трубки.

У закладці Solver Control задається точність виходу на стале рішення (Residual Target за умовчужанням $10e-4$), кількість ітерацій до зупинки, вибір тимчасового кроку інтегрування системи рівнянь. У цій вкладці змінюємо тільки параметр Max. Iteration на 1000. Після цього зберігаємо проект і закриваємо CFX-Pre.

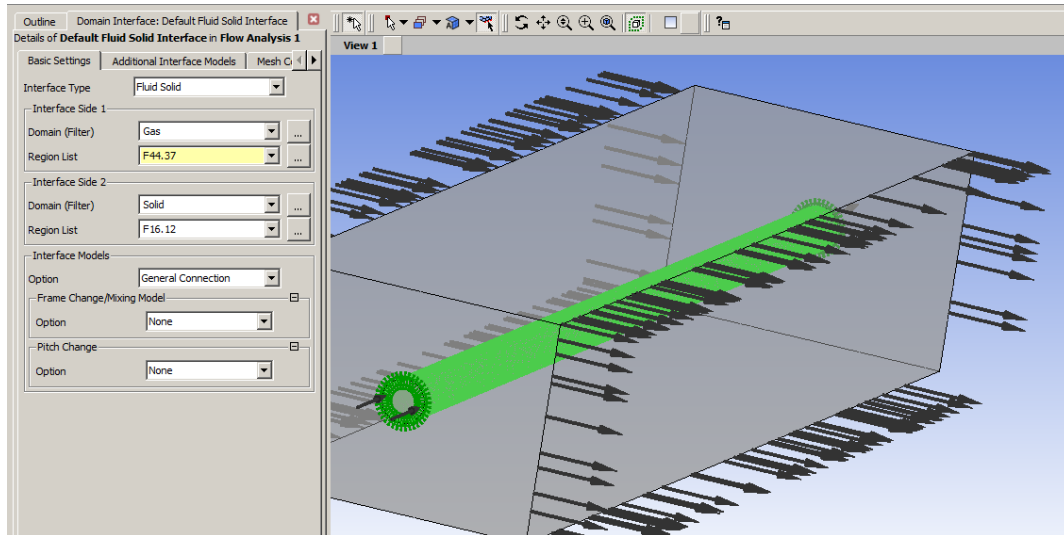


Рисунок 4.11 – Взаємодія доменів газу та твердої стінки

4. Solution. Рішення виробляється солвером CFX. При завданні особливостей розрахунку у вікні Run Definition у вкладці Run Mode можна вибрати Platform MPI Local Parallel, що буде означати розпаралелювання розрахунку на кілька ядер процесора.

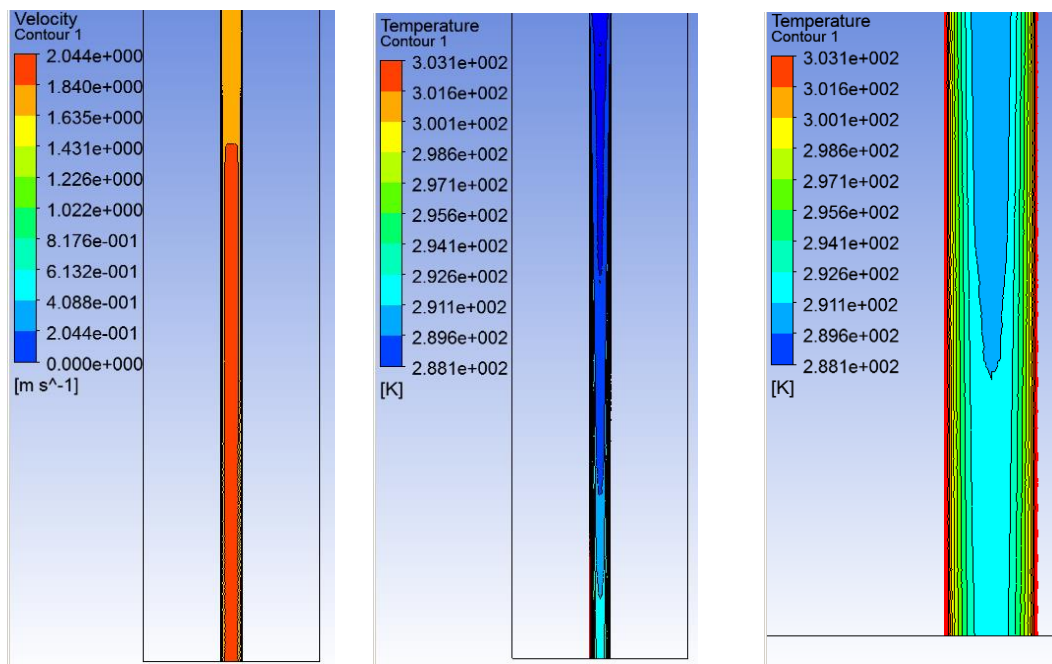


Рисунок 4.12 – Поля швидкості та температури в площині симетрії трубки з водою

5. Results. З появою у вікні розглянутої моделі варто ініціювати завдання площини (поверхні й т.д.) для візуалізації поля течії застосуванням

команди Location>Plane>InsertPlane, у вікні вибрати метод завдання й нажати Apply. Для ілюстрації поля температур у рідині при завданні площини можна вказати побудову не в повному обсязі, а тільки в домені Water. Потім будуюмо ізолінії за командою Insert Contour: у вікні, що випадає, Details Of Contour вибираються області побудови Domains – Water, місця, на яких виконується побудова Locations, задається найменування змінної Variable, кількість ізоліній Number Of Contour, у закладці Render доступні прозорість полів Transparency, підсвічування поля Lighting й інші опції. Результат побудови ізоліній швидкостей і температур у трубці з водою показані на рис. 4.12. На цьому рисунку для покращення картин зміни температури наведено передачу тепла від води з 90 С до води з 15 С.

У калькуляторі Function Calculator обчислюємо інтегральні параметри температури на виході трубки з водою. Щоб порахувати температуру необхідно перейти у вкладку Calculators, потім нажати Function Calculator, потім у вкладці Function вибрати areaAve (середнє за площею); у вкладці Location вибрати Outlet; у вкладці Variable – Static Temperature; потім нажати Calculate. У результаті розрахунку одержуємо середню температуру на виході із трубки з водою 25 °С, що означає збільшення температури води в результаті теплообміну на 10 °С.

Зміст звіту

Звіт має містити найменування і мету роботи, рисунки (скріншоти) геометрії, сітки, граничних умов та результатів, висновки.

Контрольні питання

1. Що таке інтерфейс та як він використовується під час розрахунків?
2. Навіщо використовувати декілька доменів?
3. Чи можна побудувати три різні сітки та поєднати їх препроцесорі, чи треба їх створювати одночасно?
4. Як налаштувати границі між різними тілами?
5. Якщо необхідно забезпечити перехід рідини з одного тіла в інше чи обов'язково створювати сітку таким чином, щоб центри граней елементів сітки співпали?

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ 6-8. ПРОЕКТУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА, РОЗРАХУНОК ТЕЧІЇ В НЬОМУ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Мета роботи: знайомство з проектуванням відцентрового насоса за допомогою CAD/CAM/CAE систем й використанням програмних модулів Vista CPD, BladeGen, TurboGrid.

Необхідно спроектувати відцентровий насос з наступними вихідними параметрами: подача води $Q = 40 \text{ м}^3/\text{год}$, напір $H = 25 \text{ м}$. Провести розрахунок характеристики спроектованого насоса.

1. Геометрія. В даній лабораторній роботі геометрію насоса будувати не потрібно, тому що вона буде розрахована й спроектована за допомогою програми VistaCPD (Рис. 6.1). Ця програма входить до програм Ansys та дозволяє спроектувати геометричні розміри лопатей відцентрового насоса та його спіральний відвід [11].

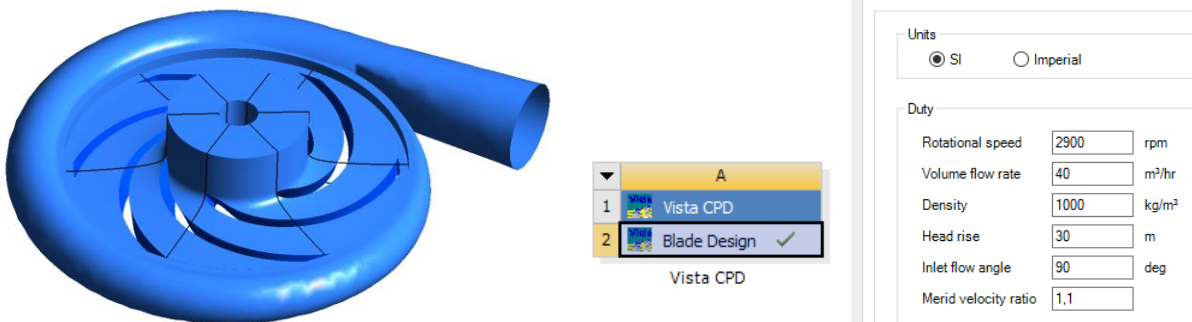


Рисунок 6.1 – Проектування відцентрового насоса за допомогою модуля Ansys VistaCPD

Для проектування насоса вводимо вхідні для розрахунку параметри у вікні VistaCPD (Рис. 6.1). Після чого треба натиснути кнопку «Calculate» для розрахунку. Результати наведені на рис. 6.2. Для того щоб спроектувати спіральний відвід необхідно натиснути у панелі вибору розрахунку та змінити «Impeller» на «Volute». Результати розрахунку спірального відводу наведено на рис. 6.3.

Подальше коригування параметрів робочого колеса можливе в програмному модулі Ansys BladeGen (Рис. 6.4). У цій програмі можливе налаштування кутів лопаті й інших параметрів лопаті, а також їх кількість (Рис. 6.5). В даній роботі ми залишимо параметри лопаті без змін за замовчуванням. Їх кількість – 6. Якщо потрібна подальша оптимізація характеристики насоса можлива зміни товщини лопаті та інших параметрів [12].

Operating conditions		Geometry		Results	
Overall performance					
Ωs	Ns	nq	Nss	power (kW)	
0.46	1270	24.6	3.15	5.2	
head coeff	flow coeff	Ks	NPSHr (m)	diffn ratio	
0.471	0.017	1.106	2.34	-0.067	
Impeller inlet					
Dh (mm)	De (mm)	Thk (mm)			
20.0	71.5	4.9			
D1 (mm)	Cu1 (m/s)	Cm1 (m/s)	U1 (m/s)	W1 (m/s)	β 1 (deg)
45.6	0.00	4.12	6.92	8.05	36.01
58.7	0.00	4.57	8.91	10.02	29.45
71.8	0.00	5.03	10.90	12.01	24.78
					β 1 (deg)
					inc (deg)
					5.27
					2.28
					0.00
Impeller exit					
D2 (mm)	B2 (mm)	lean (deg)	β 2 (deg)	W2 (m/s)	
164.6	12.1	0.0	12.05	10.69	
α 2 (deg)	C2 (m/s)	Wslip/U2	U2 (m/s)	Cu2 (m/s)	
8.71	14.72	0.20	25.00	14.55	

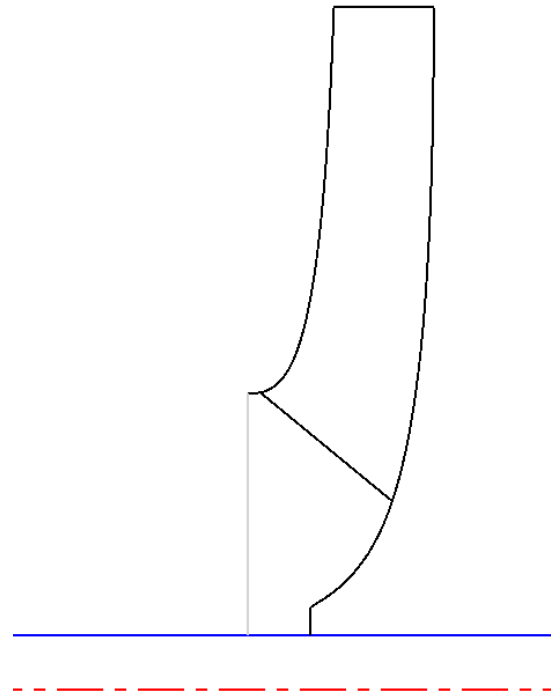


Рисунок 6.2 – Результати розрахунку параметрів робочого колеса відцентрового колеса за допомогою Ansys VistaCPD

Operating conditions		Geometry		Results		
Inlet width	24.1 mm	Cutwater clearance	9.0 mm			
Base circle radius	91.3 mm	Cutwater thickness	3.5 mm			
Sections, cutwater to throat						
No.	Area mm ²	Centroid radius mm	Outer radius mm	Major radius mm	Minor radius mm	
1	0	91.3	91.3	12.1	0.0	Cutwater
2	115	93.9	97.3	12.1	6.1	
3	228	91.3	103.3	12.1	12.1	
4	360	98.7	108.2	12.8	12.8	
5	490	100.6	112.2	13.9	13.9	
6	624	102.4	115.7	15.2	15.2	
7	761	104.0	118.9	16.4	16.4	
8	900	105.5	121.8	17.7	17.7	
9	1051	107.7	125.5	18.9	18.9	Throat
Diffuser						
Exit Area	1650 mm ²	Length	91.3 mm			
Exit Hyd Diameter	45.8 mm	Cone angle	5.8 deg			

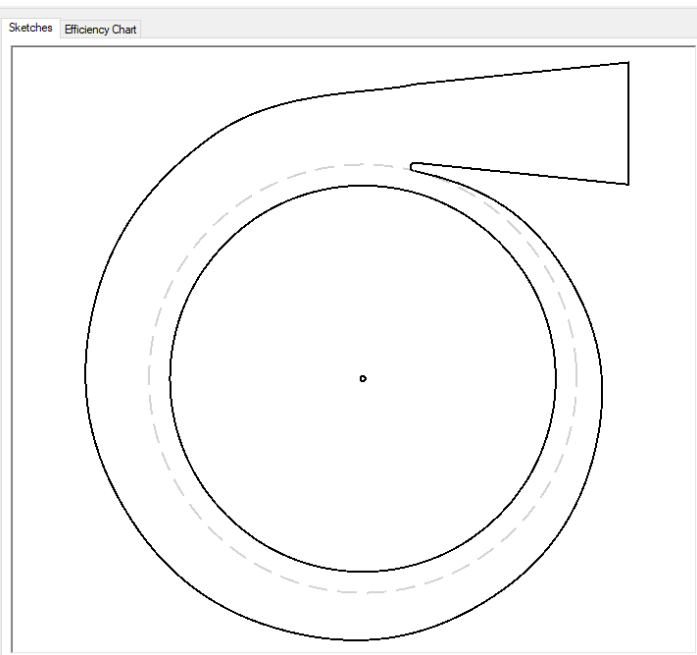


Рисунок 6.3 – Результати розрахунку геометричних параметрів спірального відводу відцентрового колеса за допомогою Ansys VistaCPD

Для створення геометрії спірального відводу необхідно натиснути у вікні Workbench на модуль Ansys VistaCPD та обрати створення геометрії нового спірального відводу, як це показано на рис. 6.4.

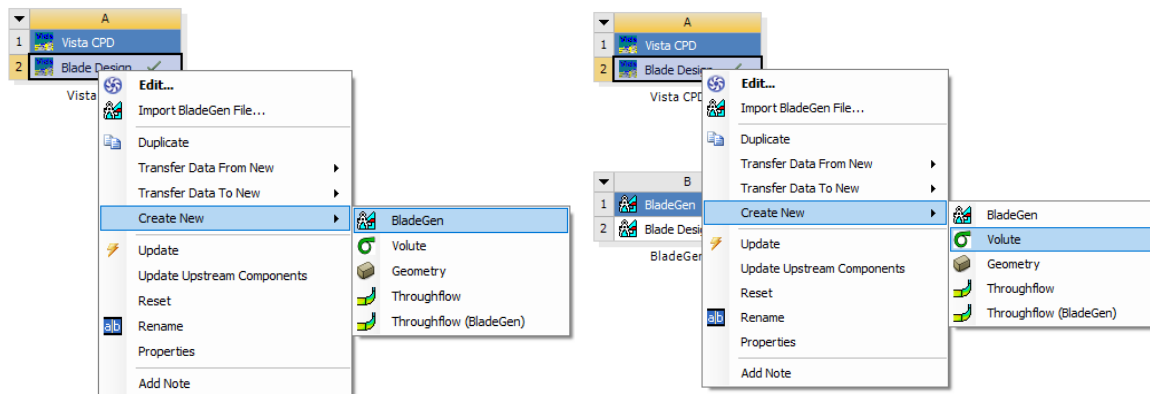


Рисунок 6.4 – Створення геометричної моделі робочого колеса та спірального відводу за допомогою модуля Ansys VistaCPD

Після цієї операції буде створено новий блок Mesh (рис. 6.6) у вікні Workbench, в якому, в автоматичному режимі буде створено геометрію та сітку для спірального відводу.

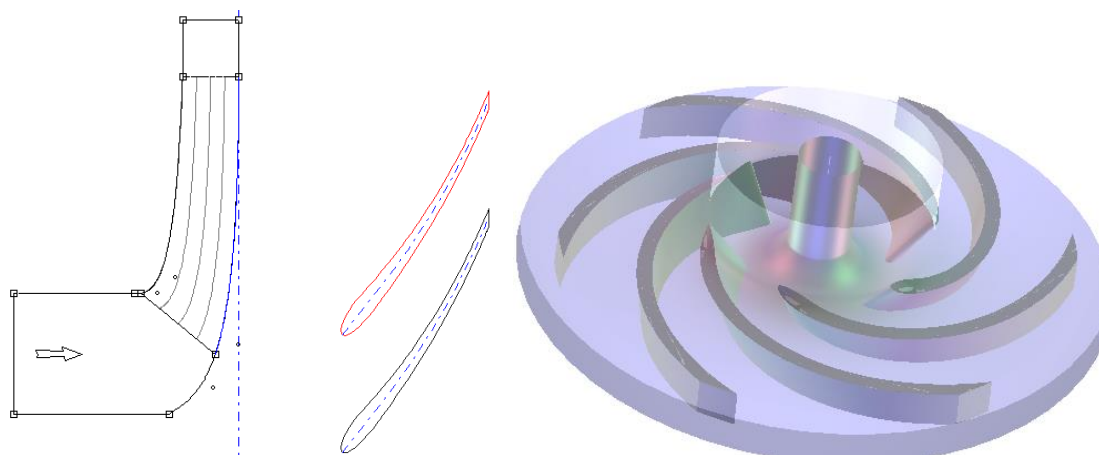


Рисунок 6.5 – Налаштування геометрії лопаті у програмному модулі Ansys BladeGen

За потреби можна увійти у вікно Meshing та змінити налаштування пристінного призматичного шару чи розмір елемента, але треба пам'ятати, що загальна кількість елементів для робочого колеса зі спіральним відводом не може перевищувати 500 тис. елементів, що є обмеженням студентської ліцензії на такий вид розрахунку [13, 14].

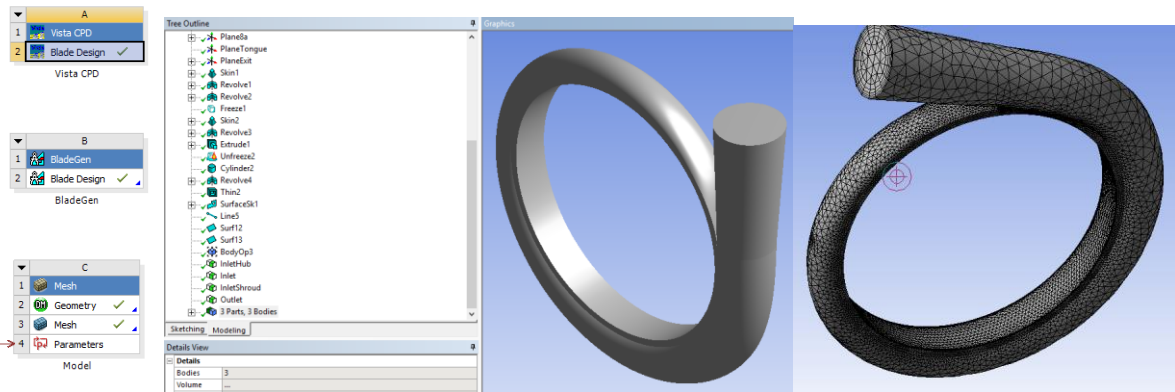


Рисунок 6.6 – Створення геометрії та сітки в автоматичному режимі для блоку Mesh

Таким чином, сітку для спірального відводу зроблено й можна перейти до створення сітки для робочого колеса. Створення сіткового розбиття робочого колеса можливе використанням двох окремих модулів побудови сітки: звичайного Meshing та TurboGrid. Для створення сітки за допомогою Meshing достатньо натиснути ПКМ на блок BladeGen у вікні Workbench і з'явиться перша опція «Create New Blade CFD Mesh» й, по аналогії зі спіральним відводом, побудується сітка у блоці Mesh в автоматичному режимі. Автоматичний режим передбачає побудову тетрагональної сітки з автоматичним створенням пристінного подрібнення елементів.

Розрахунок течії у гідравлічній машині потребує створення детальної геометрії та якісної сітки, що неможливо зробити за обмеження студентської ліцензії в 500 тис. елементів. Згідно з великою кількістю розрахунків та порівнянь з експериментальними даними для отримання якісних результатів, скоріше за все, знадобиться більше ніж 8-10 млн. елементів. Це не означає, що за обмеження студентської ліцензії розрахунок неможливо зробити взагалі. Це означає, що слід очікувати певного неспівпадіння між результатами експериментального дослідження течії та розрахункового. Для того, щоб збільшити шанси на отримання якісного результату слід шукати компроміс між моделями турбулентності, видом елемента, що використовується для побудови сітки, та зміною характеристик за кутом повороту. Якщо зневажити останнім параметром, можливе використання у розрахунку лише однієї лопаті з копіюванням розрахунку течії на інші п'ять лопатей. Автоматична побудова сітки за допомогою обох програм Meshing та TurboGrid передбачає побудову сітки саме для одного сектора, в який входить одна лопать. Цей сектор буде мати кут, що дорівнює відношенню повного обороту в 360° до кількості лопатей. В нашому випадку $360^\circ / 6 = 60^\circ$. Використання такого сектору в подальшому розрахунку дозволить значно зменшити кількість елементів для робочого колеса (в шість разів), але це не дозволить отримати ефекти зміни кінематичних параметрів руху для різних лопатей, тому що програма

скопіює результати розрахунку та використовує їх для відображення кінематики інших лопатей.

Другим шляхом економії кількості елементів є використання гексагональних елементів в сітці. Така сітка будується значно складніше, ніж тетрагональна сітка в автоматичному режимі, але її використання дозволяє очікувати зменшення кількості елементів за збереження їх розмірів у 4-6 разів. Побудувати гексагональну сітку можливо в обох редакторах сіток, але для цього потрібно мати певний досвід.

Програмний модуль TurboGrid створений спеціально для побудови гексагональної сітки елементів турбомашин, тому розглянемо як зробити таку сітку для нашого випадку лопаті відцентрового насоса. Але, перед побудовою сітки слід перевірити чи правильно створена геометрія простору біля лопаті та спірального відводу. Це можна зробити, наприклад, після створення двох сіток в автоматичному режимі та об'єднання їх в модулі Ansys CFX-Pre (Рис. 6.7).

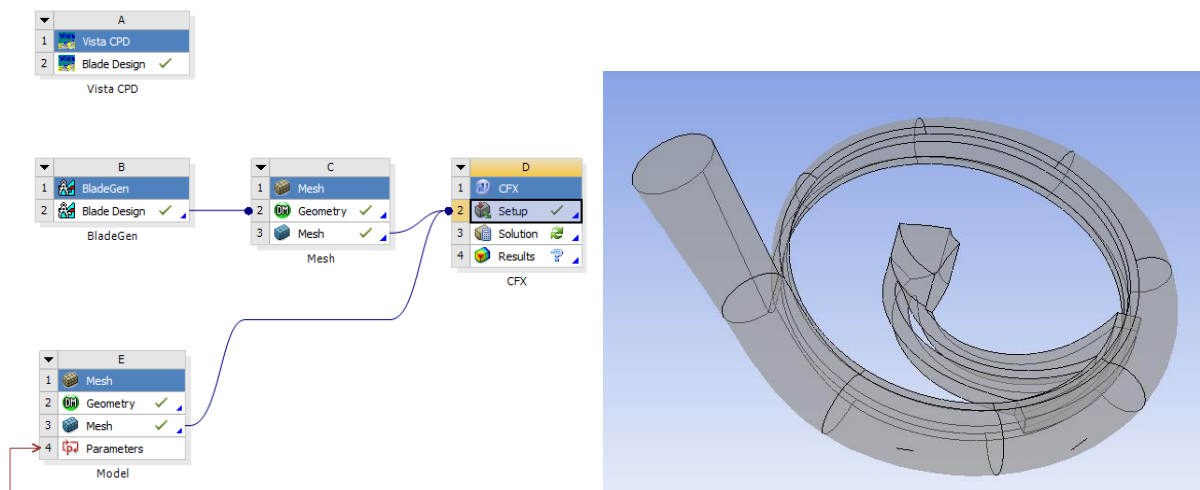


Рисунок 6.7– Об'єднання сіток в одному розрахунку Ansys CFX

Слід звернути увагу, що дві геометрії накладаються одна на одну (Рис. 6.8).

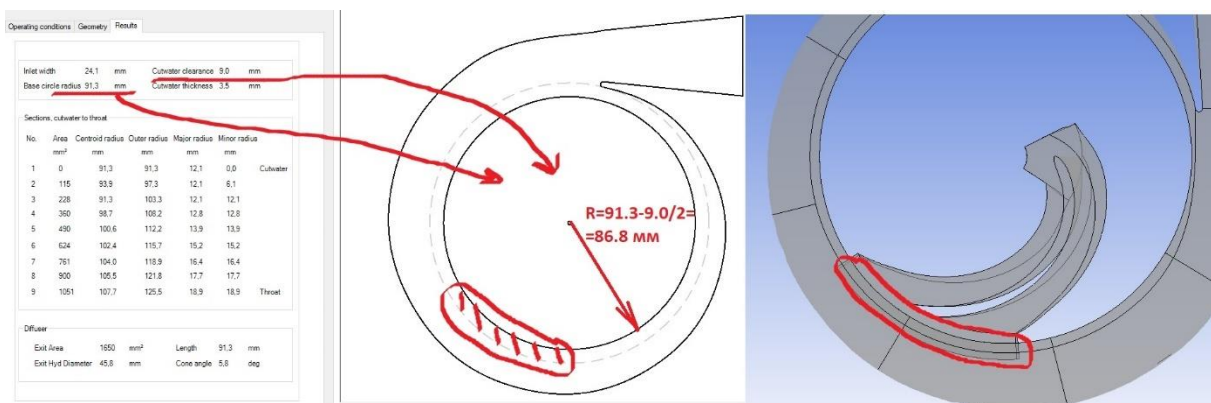


Рисунок 6.8– Коригування геометрії сектора з лопаттю

Основна проблема полягає в тому, що геометрія сектора з лопаттю знаходиться на геометрії спірального відводу. Це означає, що виконати розрахунок буде неможливо, тому що неможливо налаштувати інтерфейс переходу рідини від однієї геометрії до іншої. Таким чином, необхідно зменшити геометрію сектора з лопаттю. Найбільш простий спосіб це зробити – використати інструменти TurboGrid. Перед тим треба розрахувати діаметр або радіус, на якому геометрії повинні контактувати. З рис. 6.8 видно, що цей радіус можна розрахувати використовуючи параметри, отримані під час розрахунку спірального відводу (рис. 6.3): $\text{Base circle radius} = \text{cutwater clearance}/2$. Треба взяти значення Base circle radius (91,3 мм) й відняти від нього половину cutwater clearance (9 мм). Таким чином, ми отримали, що сектор з лопаттю повинен мати максимальний радіус 86,8 мм. Тобто нам потрібно відрізати від геометрії сектора з лопаттю частину тіла після лопаті.

Тому що для аналізу геометрій ми використали найбільш швидкі та прості способи побудови сіток. Зараз нам необхідно видалити блоки CFX та Mesh для сектора лопаті. На рис. 6.9 показана схема розрахунку у Workbench після видалення зайвих блоків та створення додаткового блоку для сітки в TurboGrid.

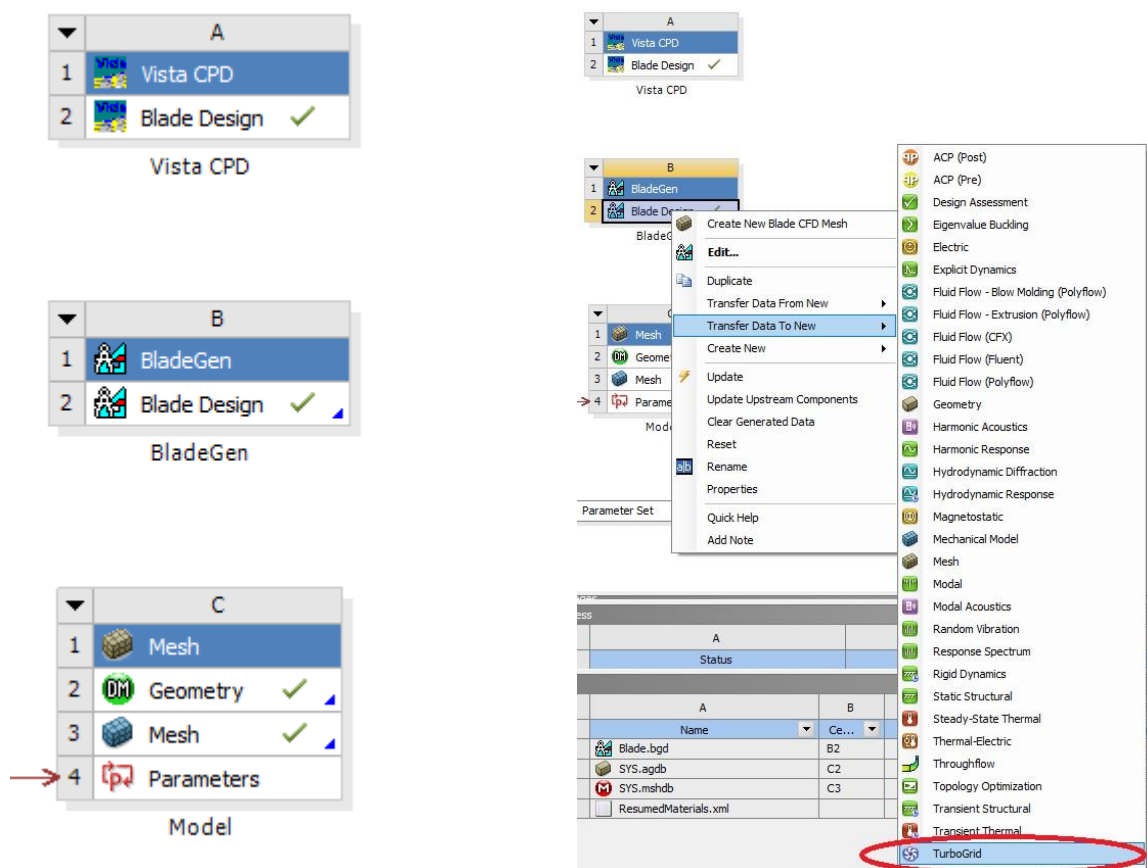


Рисунок 6.9 – Створення блоку для побудови сітки TurboGrid

Як ми вже розраховували та бачили під час об'єднання сіток, наші геометрії накладаються одна на одну. Для того, щоб зменшити область

побудови сітки в TurboGrid необхідно заборонити будувати сітку у вихідній частині сектора Outlet Domain (рис. 6.10). Це дозволить зменшити область побудови сітки та врегулювати питання накладання геометрій та сіток одна на одну й зробити так, щоб сітка в секторі з лопаттю закінчувалася саме на радіусі 86,8 мм.

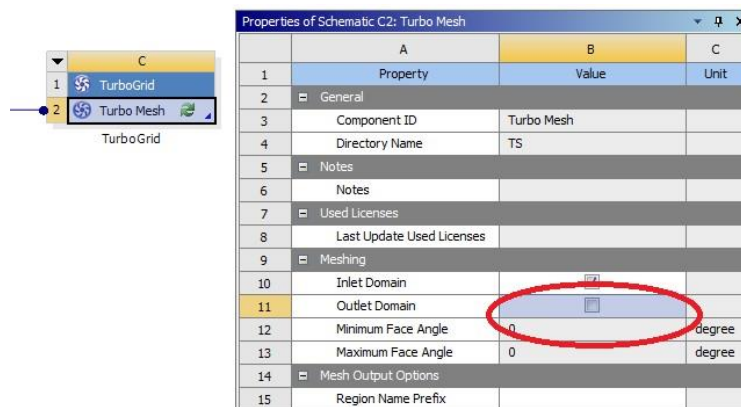


Рисунок 6.10 – Відключення побудови сітки для вихідної частини сектора за лопаттю у налаштуваннях TurboGrid

2. Сітка для сектора з лопаттю. Для побудови сітки запускаємо програмний блок TurboMesh, в якому можна побачити один сектор з однією лопаттю (Рис. 6.11). Далі необхідно вказати радіус, до якого необхідно будувати сітки. Для цього в дереві побудови необхідно знайти «Outlet», натиснути на панель Trim Outlet та поставити позначку на функції «Trim Outlet». Далі замість значення 0,0943743 (рис. 6.11) потрібно поставити значення радіуса, що було розраховано раніше 86,8 мм – 0,0868.

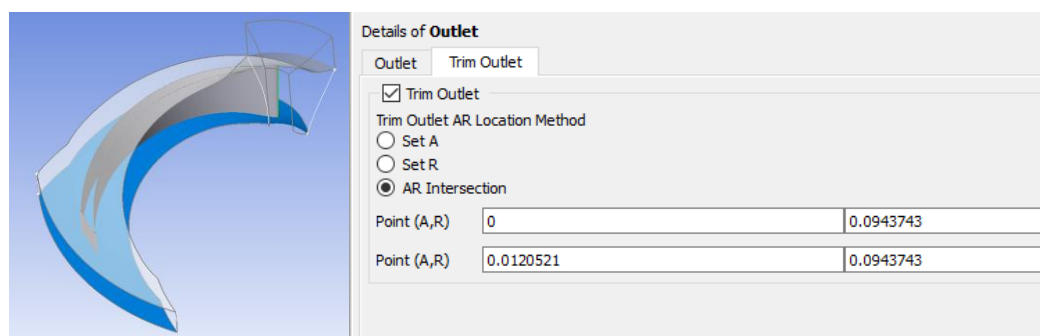


Рисунок 6.11 – Налаштування обрізання геометрії побудови сітки після лопаті

На наступному етапі необхідно знайти в дереві побудови опцію «Topology Set» натиснути «Suspend Object Updates» (Рис. 6.12), що буде означати, що процес побудови сітки можна почати, тому що за замовченням він призупинений. Результат побудови сітки можна побачити в графічному вікні. Слід звернути увагу на те, що в дереві побудови є пункти що виділено

червоним кольором. Червоний колір показує, що програма вважає, що сітка побудована з помилками й краще виправити ці помилки.

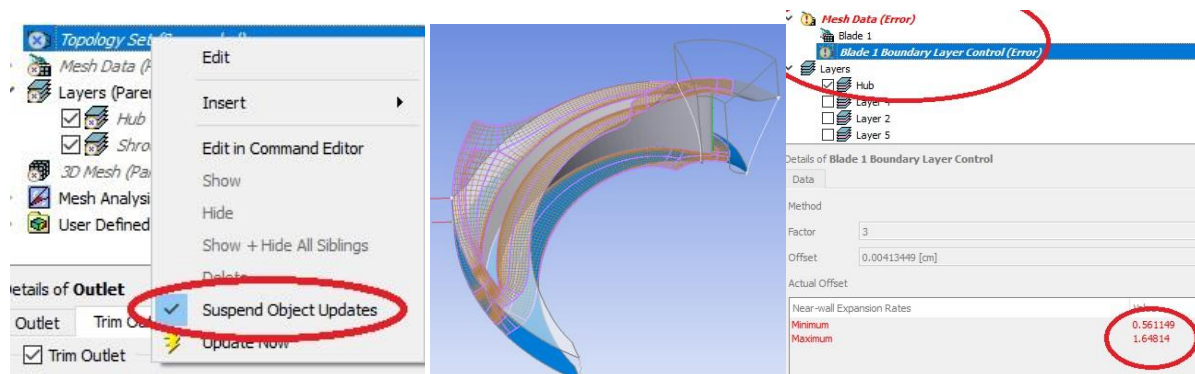


Рисунок 6.12 – Побудова сітки в TurboGrid

Найпростішим шляхом виправлення помилок буде незначне коригування параметрів за замовчуванням. Для цього необхідно увійти у пункт Mesh Data та прибрати позначку з Target Maximum Expansion Rate (Рис. 6.13). Після цього червоне виділення зникає. Краще мати максимальне значення Maximum Near-wall Expansion Rate більше за 1,0 та менше 1,5. На зараз наші значення знаходяться в діапазоні 1,247..2,836. Змінити це значення можна різними шляхами, наприклад, збільшивши значення Size Factor, що приведе до пропорційного подібнення елементів.

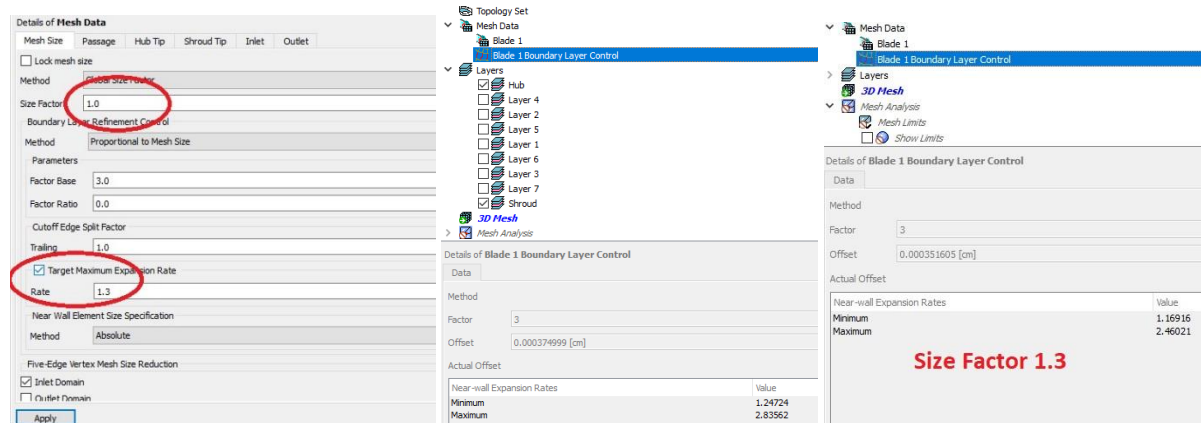


Рисунок 6.13 – Покращення якості сітки в TurboGrid

Сітка для сектора з лопаттю вже побудована й використовуватиметься у подальшому розрахунку. За потреби можна її подивитися в декількох площинах та візуально проаналізувати її якість за допомогою натискання на Layers в дереві побудови та обираючи шари, що лежать на тій або іншій висоті лопаті (Рис. 6.14).

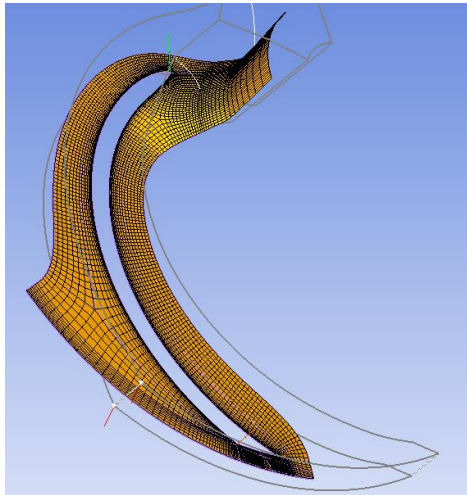


Рисунок 6.14 – Візуалізація сітки на поверхні, що проходить посередині висоти лопаті

3. Налаштування умов розрахунку в CFX-Pre. На даному етапі сітки побудовані та можливий наступний етап налаштування. Для розрахунку ми будемо використовувати Ansys CFX. Для цього натискаємо на блок TurboGrid за допомогою ПКМ та обираємо передачу даних сітки сектора з лопаттю до CFX. На даному етапі лише сітки сектора з лопаттю передана до модулю CFX. Для передачі сітки спірального підводу необхідно затиснути блок Mesh спірального відводу та перетягнути до блоку Setup CFX. Після цього отримаємо блоки, як показано на рис. 6.15. Можна бачити позначку блискавки на модулі Mesh, що означає, що треба оновити сітку саме для розрахунку в CFX.

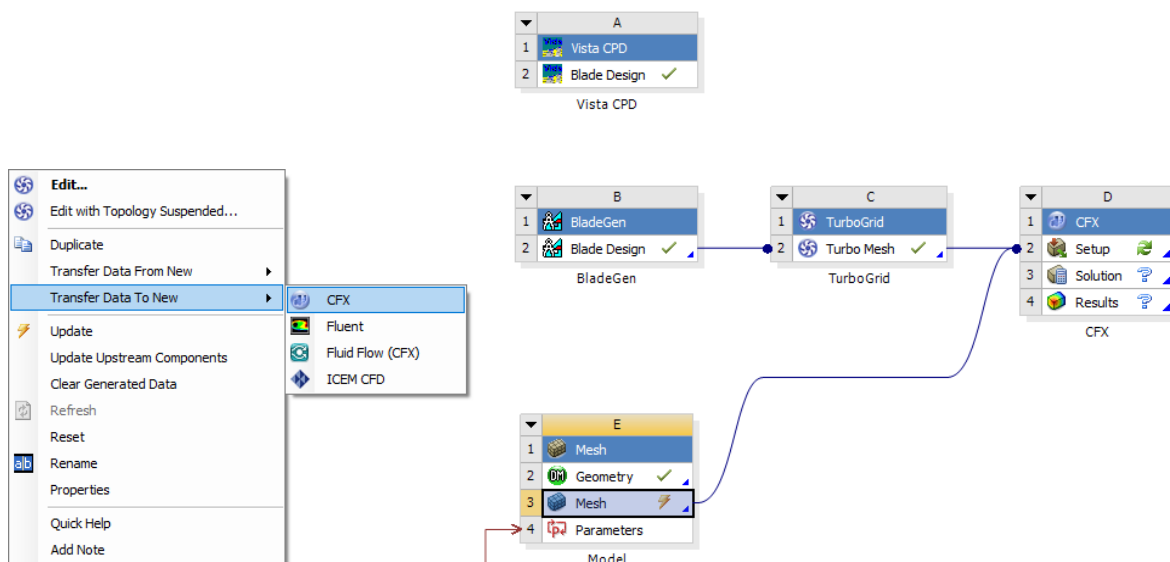


Рисунок 6.15 – Поєднання блоків розрахунку у вікні Ansys Workbench

Після оновлення спірального відводу (Update Mesh) можна запускати Setup CFX. Слід переконатися, що не відбувається накладання геометрій спірального відводу та сектора з лопаттю одна на одну (Рис. 6.16).

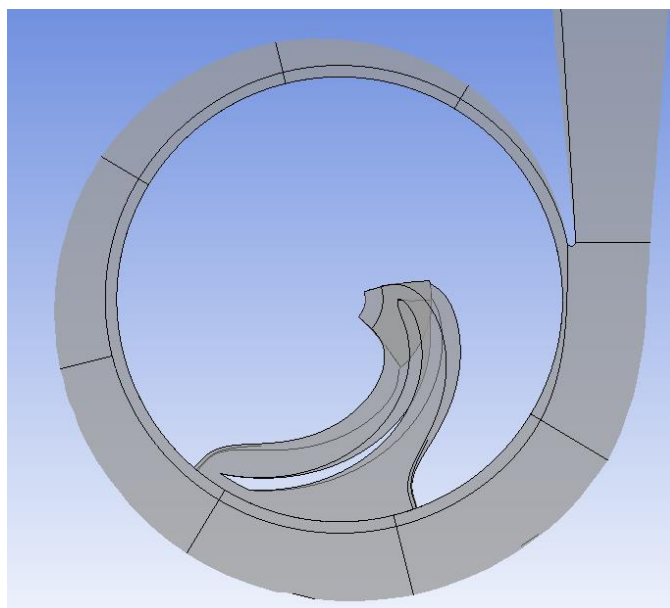


Рисунок 6.16 – Розрахункова модель відцентрового насоса в Ansys CFX

Завдання налаштувань розрахунку може бути здійснено звичайним шляхом або з використанням спеціального інструмента Turbo Mode, що дозволяє прискорити цей процес (Рис. 6.17). Завдання параметрів виконується в декілька кроків. На першому етапі задається те, що розраховуватиметься насос (Pump), обирається вісь обертання робочого колеса та стаціонарний розрахунок (Steady State).

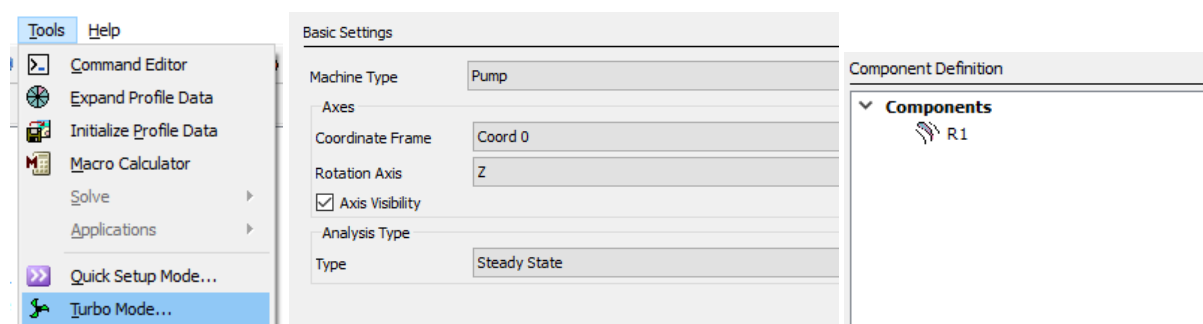


Рисунок 6.17 – Використання Turbo Mode для завдання параметрів розрахунку відцентрового насоса

На другому кроці треба узгодити домени, що беруть участь у розрахунку. Попередньо, за замовчуванням, інструмент Turbo Mode бачить лише один компонент R1 (робоче колесо). Нам необхідно додати, що спіральний відвід також буде розраховуватися. Для цього натискаємо у вільному місті ПКМ та додаємо новий компонент (Add Component). Даємо назву S1, як стаціонарний об'єкт, що не буде обертатися (S1 - Stationary).

Обираємо для цього об'єкта з доступних об'ємів (Available Volumes - Volumes) об'єм B75, що відповідає спіральному відводу (Рис. 6.18).

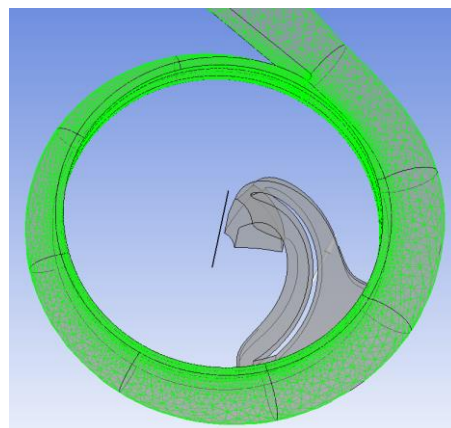
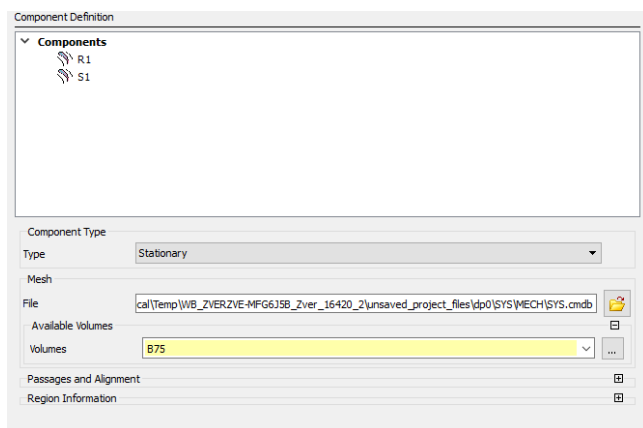


Рисунок 6.18 – Створення стаціонарного домену та вибір для нього об'єму

Подібну процедуру вибору необхідно пройти для компонента R1 (робоче колесо) й вибрати для нього об'єми Inlet Passage Main (Рис. 6.19), вказати частоту обертання та напрямок обертання.

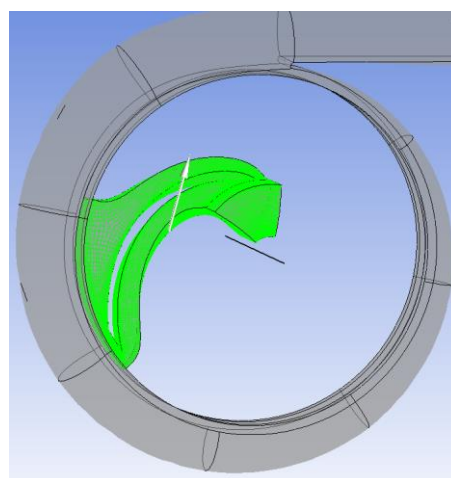
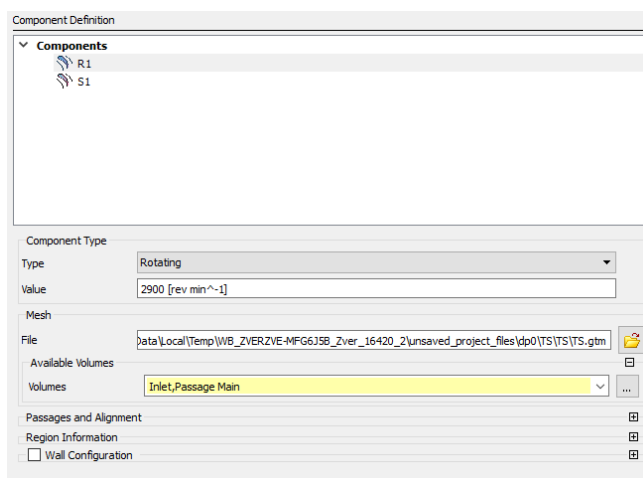


Рисунок 6.19 – Створення домену, що обертається, та вибір для нього об'єму

На наступному кроці необхідно налаштувати фізичні параметри та граничні умови (Рис. 6.20). Обираємо воду в якості рідини, що рухається проточною частиною. Модель турбулентності залишаємо $k - \varepsilon$ та не беремо до уваги теплопередачу. Як граничні умови задаємо повний тиск на вході насоса та статичний на виході (трошки збільшуємо входні до проектування 25 метрів напору тому що максимальний напір, скоріше за все, буде більшим ніж проєктований, тому що проєктований має досягатися в оптимальній за ККД точці, а найбільший за нульової витрати на виході). Значення інтерфейсу між доменами-компонентами виставляємо Frozen

Rotor. Такий інтерфейс дозволяє реалізувати перехід між ротором та дифузором без осереднення в оточуючому напрямку.

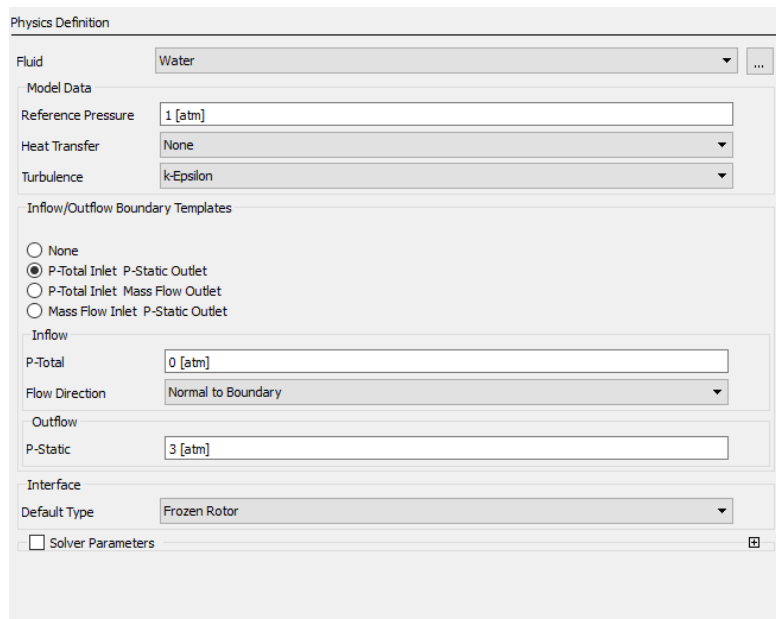


Рисунок 6.20 – Фізичні визначення розрахунку

На наступному кроці програма самостійно створює інтерфейси. Необхідно перевірити правильність та коректність вибору програмою поверхонь для інтерфейсів. Взагалі повинно бути три інтерфейси: два періодичні та перехід від ротора до статора (Рис. 6.21). Періодичні інтерфейси необхідні для реалізацій секторного підходу до моделювання.

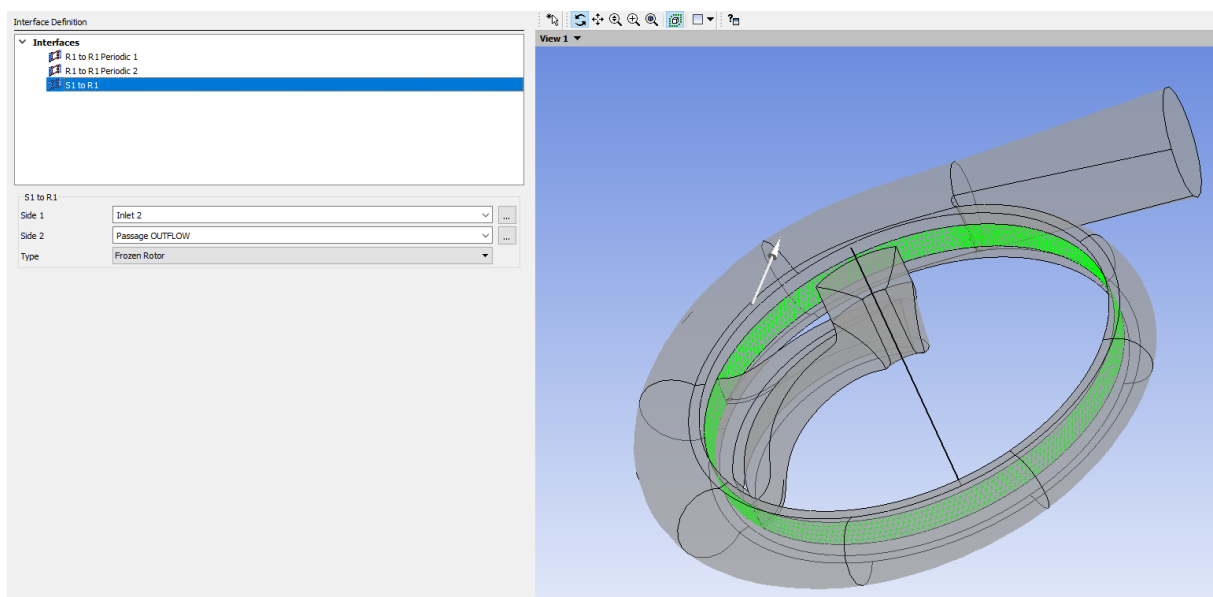


Рисунок 6.21 – Інтерфейси переходу між доменами, що створені Turbo Mode

На наступному кроці програма створює граничні умови. Треба перевірити коректність обраних поверхонь та самих граничних умов (Рис. 6.22).

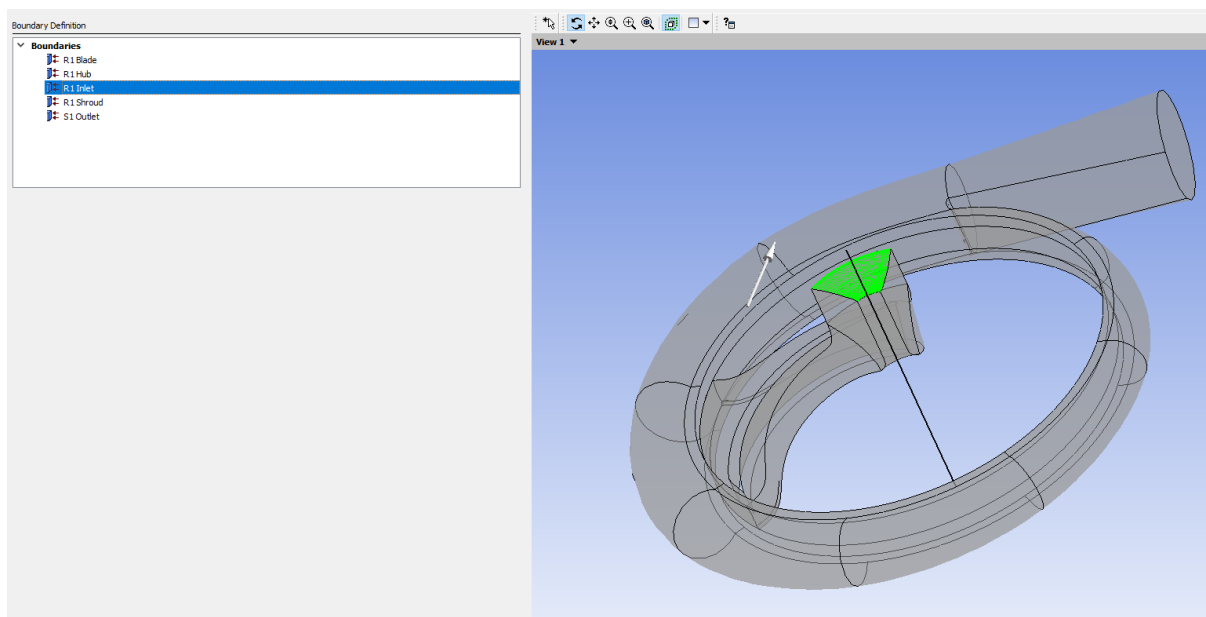


Рисунок 6.22 – Граничні умови, що створені Turbo Mode

Після цього додаткових налаштувань Turbo Mode не потребує й можна натиснути далі та закінчити налаштування.

Для інтерфейсу «S1 to R1» краще змінити порядок переходу на зворотній від R1 до S1, тобто поміняти місцями Interface Side 1 та Interface Side 2 та змінити Pitch Change з автоматичного налаштування на Specified Pitch Angles: сторона 1 - 60° (це відповідає одному сектору з однією лопаттю) та сторона 2 360° (Рис. 6.23).

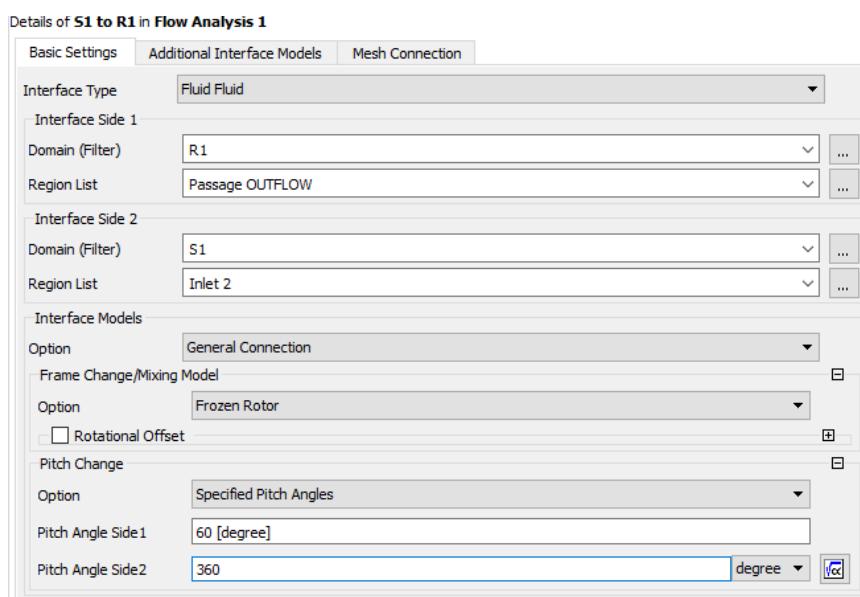


Рисунок 6.23 – Налаштування інтерфейсу між робочим колесом та спіральним відводом

Як і раніше, у параметрах Solver Control змінюємо кількість ітерацій на 1000 та цільову помилку (Residual Target) на 0,00001. Після чого закриваємо вікно CFX-Pre.

4. Розрахунок. Зазвичай метою розрахунку є отримання характеристики насоса. Характеристика являє собою залежність напору насоса від подачі. Є дві стратегії отримання характеристики: створення декількох def-файлів з різними статичними тисками на виході або зміна статичного тиску на виході під час розрахунку зі збереженням вже отриманих результатів для певного тиску. На рис. 6.24 показано як можна змінити числові параметри (в нашому випадку тиск на виході з насосу) граничних умов під час розрахунку.



Рисунок 6.24 – Зміна числових параметрів граничних умов під час розрахунку

Для контролю збіжності процесу рекомендується вимірювати витрати, що проходять через насос. Процес розрахунку закінчиться після досягнення цільовими показниками своїх значень, але через можливі відривання рідини від стінок лопаті на неразрахункових параметрах роботи насоса можливе періодичне збільшення та зменшення розбіжностей. У цьому випадку доцільно завершити розрахунок після досягнення сталих значень витратами. Для спостереження за витратами слід додати ще один монітор (Рис. 6.25).

На рис. 6.26 наведено приклад графіку витрат на вході та виході з насоса. В даному випадку причиною різниці витрат не є невиконання рівняння нерозривності, а наслідок того, що використовується в розрахунку лише сектор з однією лопаттю. Тому витрату на вході в сектор слід помножити на кількість лопатей. Процес розрахунку можна закінчити за досягнення витратами сталих значень, що не будуть змінюватися за, наприклад, 100 ітерацій. Виконання рівняння нерозривності виконується

коли витрата на вході помножена на кількість лопатей відповідає витраті рідини на виході.

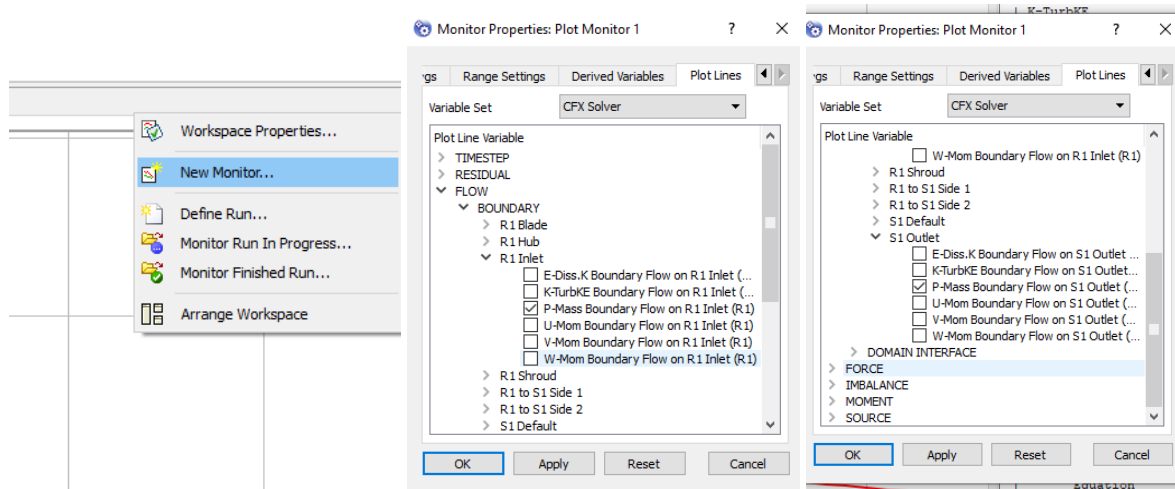


Рисунок 6.25 – Додавання монітору для аналізу зміни витрати за ітераціями

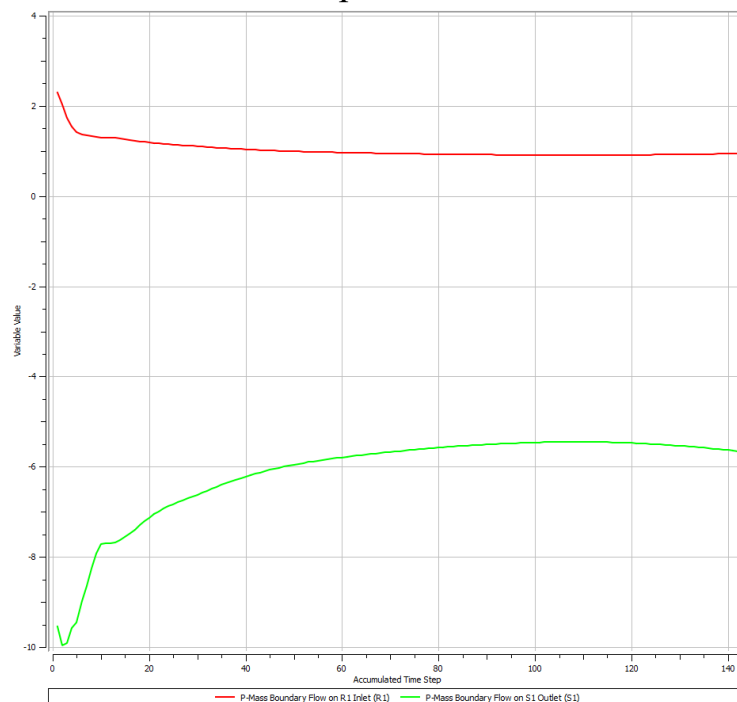


Рисунок 6.26 – Графік витрат на вході та виході з насоса за ітераціями

5. Результати розрахунку. Для аналізу результатів запускаємо блок Results, що відповідає модулю CFD-Post. В цьому модулі є окремий інструмент для роботи саме з турбомашинами, який є дуже корисним для аналізу результатів. Можливе використання вкладки Turbo, але доцільним буде використання інструменту Report (Рис. 6.27). Після запуску відбувається підготовка звіту й на екрані можна бачити окремі рисунки. Після готовності звіту слід натиснути кнопку Report Viewer на графічній моделі.

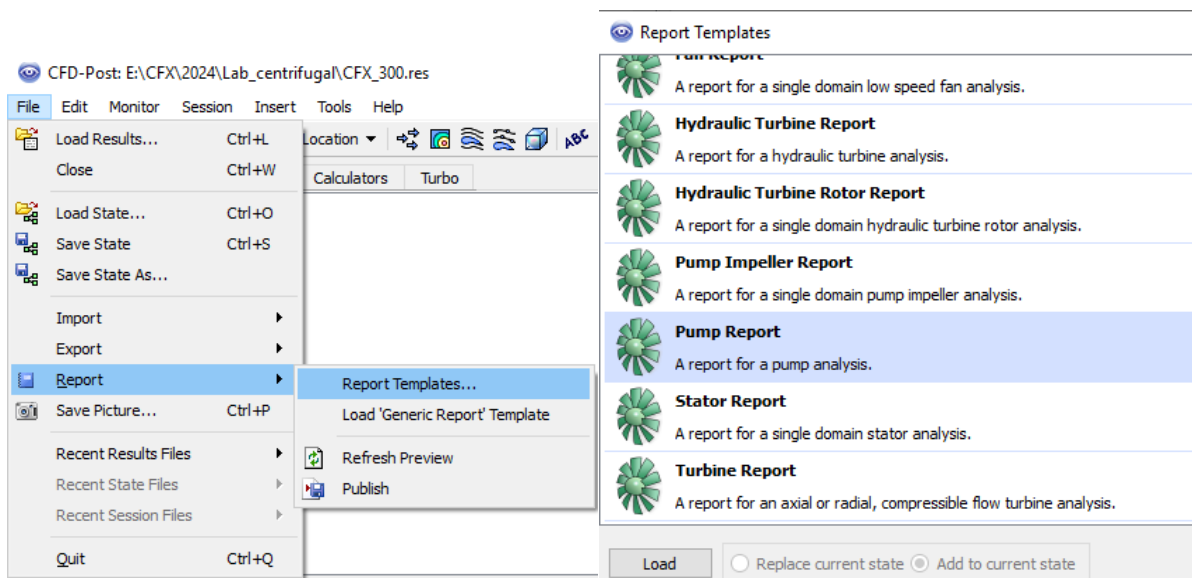


Рисунок 6.27 – Запуск шаблону звіту для аналізу роботи насоса

Звіт складається з цифрової інформації в таблицях та більше ніж десяти рисунків, що ілюструють особливості течії у робочому колесі насоса та параметри роботи насоса (Рис. 6.28) [15].

2.1. Overall Performance Results

The following table gives the overall performance for the machine.

Table 1. Overall Performance Results Table

Inlet Volume Flow Rate	0.0124 [m ³ s ⁻¹]
Reference Density	997.0000 [kg m ⁻³]
Head Rise	37.7313 [m]
Input Power	4732.9100 [W]

$$Q=0.0124 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$N=4.7 \text{ kW}$$

2.2. Stage Performance Results

The following table(s) give a summary of the performance results for each stage.

Table 2. Stage 1 Performance Results

Rotation Speed	303.6870 [radian s ⁻¹]
Inlet Volume Flow Rate	0.0124 [m ³ s ⁻¹]
Reference Density	997.0000 [kg m ⁻³]
Reference Diameter	0.0822 [m]
Input Power	4732.9100 [W]
Capacity Coefficient	0.0732
Head Coefficient	0.5936
Power Coefficient	0.0451
Total-to-Total Head	37.7313 [m]
Total-to-Static Head	26.6638 [m]
Total-to-Total Efficiency %	93.3568
Total-to-Static Efficiency %	67.2321
Diffuser Loss Coef., Y1	0.0347
Diffuser Loss Coef., Y2	0.0359
Diffuser Loss Coef., Y3	0.1066
Diffuser Loss Coef., Y4	0.1284
Diffuser Cp	0.0632

Рисунок 6.28 – Приклад сторінки звіту характеристик робочої точки насоса

Робота насоса характеризується його подачею, напором, споживаною потужністю, ККД та частотою обертання. Розглянемо розрахунок цих параметрів за результатами симуляції робочої точки спроектованого за

допомогою Ansys VistaCPD насоса. Подача насоса може розраховуватися за допомогою калькулятора, що вбудовано в CFD-Post або визначена за звітом (Рис. 6.28). Напір представляє собою різницю енергій одиниці ваги рідини в перетині потоку після насоса та перед ним:

$$H = z_2 - z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g},$$

де z_2, z_1 – геометричні висоти перетинів після насоса (індекс 2) та перед ним (індекс 1) відповідно; p_2, p_1 – статичні тиски після насоса та перед ним; V_2, V_1 – середні швидкості рідини у перетинах після насоса та перед ним; ρ – густина рідини. Зневажаємо різницею геометричних висот внаслідок незначного впливу на загальний напір. Крім того, під час розрахунку не здійснювалися налаштування для врахування впливу гравітації.

Параметри потоку після насоса не наведено у таблицях звіту, тому їх необхідно розрахувати за допомогою калькулятора. Слід зауважити, що параметри в таблиці на рис. 6.29 в стовпчику Outlet наведено для перетину виходу з робочого колеса перед спіральним відводом [16, 17]. Параметри на вході насоса можна взяти з таблиць звіту (рис. 6.29).

Table 3. Component 1 Summary Data Table

Quantity	Inlet	LE Cut	TE Cut	Outlet	TE/LE	TE-LE	Units
Density	997.0000	997.0000	997.0000	997.0000	N/A	N/A	[kg m ⁻³]
Pstatic	P1 -5593.9300	-8295.0700	250013.0000	257629.0000	N/A	258308.0000	[Pa]
Ptotal	-24.6186	2131.9100	370605.0000	357746.0000	N/A	368473.0000	[Pa]
Ptotal (rot)	-333.0390	-2494.9300	-10511.9000	-3977.4100	N/A	-8016.9800	[Pa]
Head	-0.0026	-0.0112	38.0110	37.7287	N/A	38.0223	[m]
Static Head	-0.5724	-1.2316	25.5392	26.6613	N/A	26.7708	[m]
U	7.6893	9.0279	24.9672	26.3599	2.7656	15.9393	[m s ⁻¹]
Cm	3.3391	3.9908	2.3571	2.2702	0.5906	-1.6337	[m s ⁻¹]
Cu	0.0199	0.5085	15.3106	13.7638	30.1118	14.8021	[m s ⁻¹]
C	V1 3.3420	4.4241	15.5144	13.9806	3.5068	11.0903	[m s ⁻¹]
Wu	-7.6694	-8.5197	-9.6567	-12.5961	1.1335	-1.1370	[m s ⁻¹]
W	8.4121	9.4637	9.9759	12.8341	1.0541	0.5123	[m s ⁻¹]
Distortion Parameter	1.0008	1.1974	1.0152	1.0774	0.8479	N/A	
Flow Angle: Alpha	0.3358	16.7484	81.2865	82.5673	N/A	64.5381	[degree]
Flow Angle: Beta	-64.9313	-46.1459	-76.3267	-45.7623	N/A	-30.1808	[degree]

Рисунок 6.29 – Використання даних щодо параметрів рідини на вході в насос

Приклад розрахунку середньої швидкості у вихідному перетині насоса за допомогою калькулятора, що вбудовано в CFD-Post показано на рис. 6.30. Для розрахунку необхідно вказати в якості функції AreaAve (середня за площею), в якості поверхні для розрахунку – S1 Outlet (вихідна гранична умова спірального відводу), в якості змінної – Velocity

(швидкість). Результат розрахунку – 7,68 м/с. Після зміни змінної розрахунку на Pressure визначається середній за площею статичний тиск – 300000 Па, що відповідає граничній умові, яка була задана на початку розрахунку.

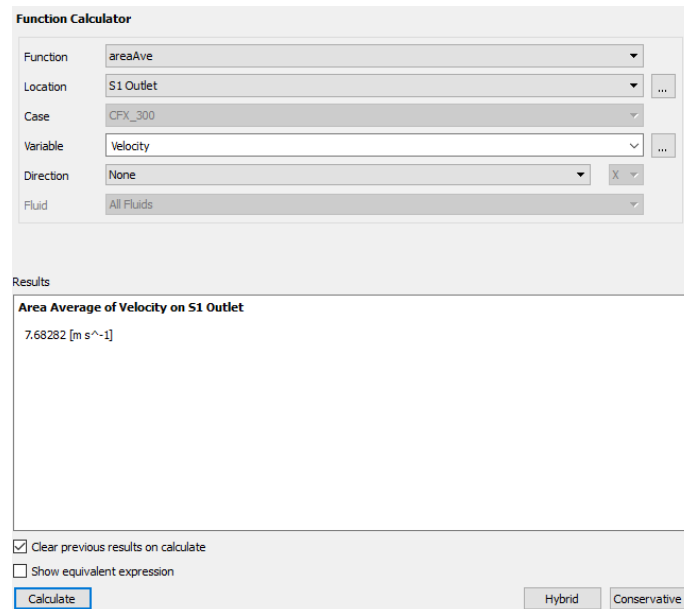


Рисунок 6.30 – Розрахунок середньої швидкості у вихідному перетині насоса

Таким чином можна розрахувати напір насоса:

$$H = \frac{300000 + 5590}{997 \cdot 9.81} + \frac{7.68^2 - 3.34^2}{2 \cdot 9.81} = 31.2 + 2.4 = 33.6 \text{ м.}$$

Споживану потужність насоса можна визначити за допомогою звіту (Рис. 6.28): $N = 4.7$ кВт. Корисна потужність насоса розраховується за формулою:

$$N_u = \rho g Q H = 9.81 \cdot 997 \cdot 0.0124 \cdot 33.6 = 4080 \text{ Вт.}$$

Гідравлічний ККД насоса:

$$\eta = \frac{N_u}{N} = \frac{4080}{4730} \cdot 100\% = 86.3\% .$$

Аналогічно розраховуються параметри насоса для інших робочих точок. Інші робочі точки отримують змінюючи тиск на виході з насоса. Результати розрахунків наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристика відцентрового насоса

№ робочої точки	Q , л/с	H , м	N , кВт	η
1	0,9	34,5	1,9	0,16
2	7	34,7	3,0	0,79
3	11,1	34,1	4,3	0,86
4	12,4	33,7	4,7	0,87
5	13,1	33,0	4,97	0,85
6	13,6	32,3	5,1	0,84
7	14,2	31,4	5,3	0,82
8	14,7	30,9	5,45	0,81
9	15,1	30,1	5,56	0,8

Далі будемо характеристику насоса (рис. 6.31). Порівнюємо характеристику спроектованого насоса з вхідними до розрахунку параметрами $Q=40 \text{ м}^3/\text{год} = 11,1 \text{ л/с}$ та $H=30 \text{ м}$. Відзначаємо, що спроектований насос забезпечує вхідні параметри та за подачі $Q=11,1 \text{ л/с}$ забезпечує напір $H=34 \text{ м}$, що більше ніж на 10 % більше, ніж заданий напір. Ця точка практично відповідає оптимальній точці насоса з ККД $\eta=0,86$.

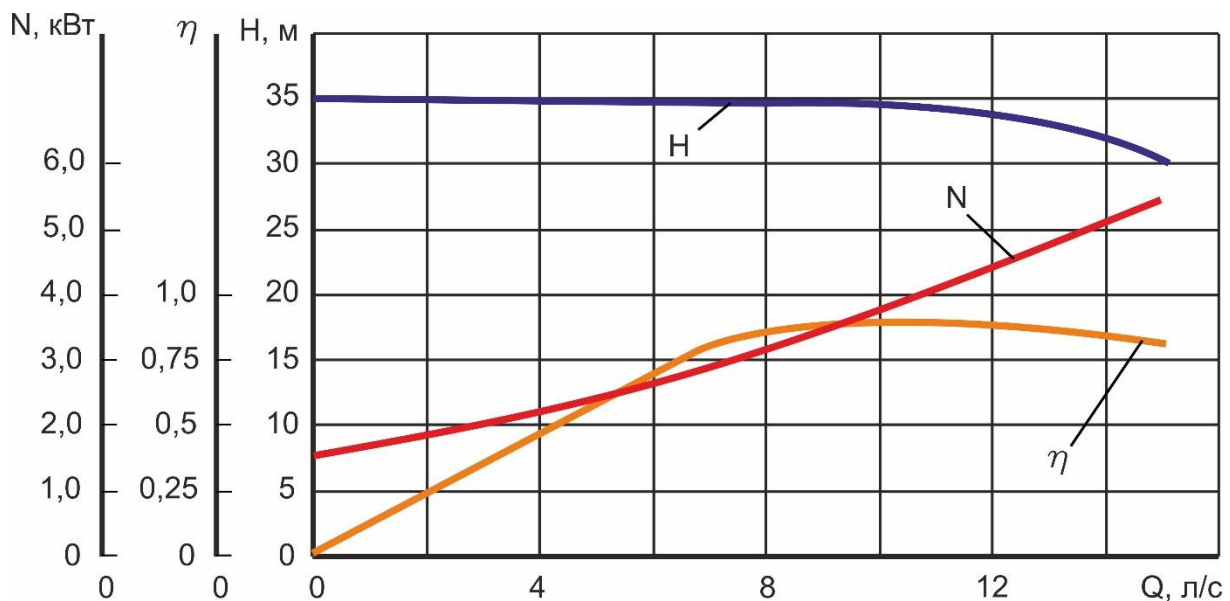


Рисунок 6.31 – Характеристика спроектованого відцентрового насоса зі спіральним відводом

Для проектування під час лабораторної роботи використано вхідні умови, що відповідають умовам реального насоса BS-12. Цей реальний насос забезпечує вхідні параметри з ККД $\eta=0,74$, що вказує на те, що спроектований насос на 14 % ефективніший за прототип. Крім того,

спроектований насос має широку зону оптимальної роботи від 7 до 15 л/с з ККД, який вище за 75%.

Зміст звіту

Звіт має містити найменування і мету роботи, рисунки (скріншоти) геометрії, сітки, граничних умов та результатів, висновки.

Контрольні питання

1. Чи обов'язково потрібно проектувати насос за допомогою Ansys Vista CPD чи можна завантажити власну геометрію?
2. Що робити, якщо геометрії спірального відводу та лопатевого сектору знаходяться одна на одну? Чи можна їх використовувати?
3. Чи можна обійтися без інтерфейсів під час моделювання відцентрового насоса? Які інтерфейси є обов'язковими?
4. Чи обов'язково мати однакову сітку на границях інтерфейсу з умовою періодичності?
5. Як розрахувати та побудувати характеристику насоса після отримання даних однієї точки?

ЛІТЕРАТУРА

1. Роговий А.С. Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу: навчальний посібник / А.С. Роговий. – Харків: ХНАДУ, 2018. – 112 с.
2. Rogovyi, A., Chernetska-Biletska, N., Miroshnykova, M., Baranov, I., & Polupan, Y. (2023). Improvement of cleaning parameters of pipeline elements based on simulation of movement of solid magnetite particles in electrically conductive liquid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 121(5).
3. Методичні вказівки до розрахункової роботи «Визначення течії у каналі і втрат повного тиску» по курсу «Математичне моделювання робочих процесів гідротурбін» / Укл. В.Г. Солодов – Харків: вид-во НТУ «ХПІ», 2015. – 18 с.
4. Rogovyi, A., Neskorozenyi, A., Krasnikov, S., Tynyanova, I., Khovanskyi, S. (2023). Improvement of Vortex Chamber Supercharger Performances Using Slotted Rectangular Channel. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.
5. Загорулько А.В. Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 201 с.
6. Роговий, А. С., Азаров, А. С., & Демчук, Р. М. (2023). Удосконалення характеристик робочого колеса високонапірного відцентрового компресора проектуванням за допомогою САПР. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*, (1), 25-30.
7. Lee, H. H. (2018). *Finite element simulations with ANSYS Workbench 18*. SDC publications.
8. Роговий А.С. Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17. Харків, 2017. 364 с.
9. Математичне моделювання систем та процесів Комп'ютерний практикум [Текст] : навч. посіб. для студентів спеціальності 143 “Атомна енергетика” спеціалізації “Атомні електричні станції”/ О. В. Баранюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 115 с.
10. Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 180 с.
11. Роговий, А. С., Шудрик, О. Л., Лук'янець, С. І., Нескорожений, А. О., & Лебединець, Д. В. (2023). Характеристики відцентрового насоса при перекачуванні Бінгамівської рідини із різними значеннями початкових напруг зсуву. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*, (1), 66-70.

12. Солодов В.Г. Моделювання турбулентних течій. Розрахунок великих вихорів. Харків: ХНАДУ. 2011. 167с.
13. Загорулько А.В. Програмний комплекс ANSYS в інженерних задачах: Навчальний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 201 с.
14. Роговий, А., Азаров, А., Овчаров, Є., Шудрик, О., & Толстий, П. (2023). Картини течії газу у високонапірному відцентровому компресорі. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, (1), 82-91.
15. Rogovyi A., Shudryk O., Tulska A., Basova Y., Rezvaya K., Makarov V., Machado J. Using modern mechanical design methods for determining the main characteristics of a cryogenic centrifugal pump. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. 2023. Vol. 13. P. 198–208.
16. Роговий, А., Азаров, А., Овчаров, Є., Шудрик, О., & Толстий, П. (2023). Картини течії газу у високонапірному відцентровому компресорі. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, (1), 82-91.
17. Роговий, А. С., Азаров, А. С., Шудрик, О. Л., Панамарьова, О. Б., & Лебединець, Д. В. (2023). Валідація відкритої бібліотеки OpenFoam гідротурбін для високонапірного відцентрового компресора. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати", (2), 62-66.

ДЛЯ ПОТАТОК

ДЛЯ ПОТАТОК

ДЛЯ ПОТАТОК



Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«Математичне моделювання робочого процесу гідравлічних машин»
для студентів денної та заочної форми навчання
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

Укладачі:

РОГОВИЙ Андрій Сергійович
ПАНАМАРЬОВА Ольга Борисівна

Відповідальний за випуск проф. Роговий А.С.

Роботу до видання рекомендував проф. Роговий А.С.

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 604

Підп. до друку Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 7,0.
Обл.вид. арк. Наклад 50 прим. Замовлення №

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія