

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**Розділ 2. Моделювання фізичних процесів в CAD/CAE системі
SolidWorks**

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,
за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Укладач: С. В. Плашихін

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент: *Степанюк А.Р.*, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор: *Ковалюк Д.О.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною Радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 2 від 30.09.2022 р.)*

*За поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 8 від 01.09.2022 р.)*

Навчальний посібник є частиною навчально-методичного забезпечення з дисципліни та розроблений у відповідності до її програми (силабусу). Посібник призначений для надання допомоги здобувачам в процесі підготовки та виконання комп'ютерних практичних робіт. До кожної роботи подано теоретичні відомості, порядок та приклад проведення розрахунків, оброблення результатів та оформлення звіту з практикуму. Для студентів, які навчаються за освітньою програмою Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Реєстр. № НП 22/23-097. Обсяг 5,8 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 РОЗРАХУНОК ДЕТАЛІ НА МІЦНІСТЬ В САЕ СИСТЕМІ SOLIDWORKS SIMULATION	7
5.1. Короткі теоретичні відомості.....	7
5.2. Опис практичних засобів та обладнання.....	16
5.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи.....	16
5.4. Послідовність виконання практичної роботи	17
5.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	17
5.6. Контрольні запитання	25
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 РОЗРАХУНОК АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВІАЦІЙНОГО ПРОФІЛЮ В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....	26
6.1. Короткі теоретичні відомості.....	26
6.2. Опис практичних засобів та обладнання.....	27
6.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи.....	27
6.4. Послідовність виконання роботи.....	28
6.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	28
6.6. Контрольні запитання	42
ПРАКТИЧНА РОБОТА №7 РОЗРАХУНОК СПОЛУЧЕНОГО ТЕПЛООБМІНУ В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	43
7.1. Короткі теоретичні відомості.....	43
7.2. Опис практичних засобів та обладнання.....	45
7.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи.....	45
7.4. Послідовність виконання роботи.....	45
7.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	46
7.6. Контрольні запитання	67
ПРАКТИЧНА РОБОТА №8 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООБМІННИКА В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	68
8.1. Короткі теоретичні відомості.....	68
8.2. Опис практичних засобів та обладнання.....	69
8.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи.....	69
8.4. Послідовність виконання роботи.....	69
8.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	70

8.6. Контрольні запитання	88
ПРАКТИЧНА РОБОТА №9 РОЗРАХУНОК ПОРИСУНОКТИХ ТІЛ В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....	89
9.1. Короткі теоретичні відомості.....	89
9.2. Опис практичних засобів та обладнання.....	91
9.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи.....	91
9.4. Послідовність виконання роботи.....	91
9.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	91
9.6. Контрольні запитання	106
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	107
ДОДАТОК А. ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ.....	108
ДОДАТОК Б. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №5	113
ДОДАТОК В. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №6	122
ДОДАТОК Г. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №7	123
ДОДАТОК Д. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №8	124
ДОДАТОК Е. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №9	125

ВСТУП

Навчальна дисципліна «*Параметричне моделювання технологічних процесів*» вивчається здобувачами першого рівня підготовки спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у п'ятому навчальному семестрі.

Мета і завдання практикуму – закріпити на практиці вміння та досвід, отримані в процесі вивчення кредитного модулю «Параметричне моделювання технологічних процесів». Матеріал практикуму спрямований на одержання практичних вмінь використання комп'ютерного моделювання для дослідження технологічних процесів.

Навчальна дисципліна є нормативною і згідно з структурно-логічною схемою навчання за освітньою програмою, для її успішного освоєння студент повинен:

- набути компетентності та отримати результати навчання, передбачені освітньою програмою вищої освіти ступеня бакалавра;
- мати уміння та досвід роботи з персональним комп'ютером на рівні впевненого користувача;
- засвоїти курс «Математичне моделювання» або аналогічний йому на рівні бакалаврської підготовки, а також в достатній мірі мати знання та розуміння технологічних процесів, процесів тепломасообміну та технологічних рішень; бути зацікавленим у набутті знань та досвіду у сфері вирішення практичних задач параметричного моделювання технологічних процесів.

В процесі опанування навчальної дисципліни заплановане виконання здобувачами дев'яти комп'ютерних практичних робіт. Для кожної роботи подано основні теоретичні відомості та розрахункові формули і розглянуто типовий приклад виконання. Для самоперевірки засвоєння матеріалу роботи подано контрольні запитання.

Протягом заняття здобувач повинен засвоїти тему, мету і завдання практичної роботи, повторити основні теоретичні положення за темою роботи і самостійно виконати розрахунки за своїм варіантом завдання. Роботи виконуються на персональному комп'ютері з використанням програми Solid Works. Вибір версії програмного забезпечення для їх виконання залишається за здобувачем.

Практична робота №5

Розрахунок деталі на міцність в САЕ системі SolidWorks Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички виконання розрахунку деталі на міцність в САЕ системі Solidworks Simulation.

Завдання¹ Вивчити основні елементи інтерфейсу SolidWorks Simulation. Розглянути основні критерії міцності, що використовуються в Solidworks Simulation.

5.1. Короткі теоретичні відомості

САЕ (англ. Computer-aided engineering) – загальна назва для програм, призначених для інженерних розрахунків конструкцій і аналізу фізичних процесів, пов'язаних з ними.

SolidWorks Simulation – САЕ-модуль, заснований на методі кінцевих елементів і призначений для проведення аналізу на міцність.

Метод кінцевих елементів (МКЕ) – чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики.

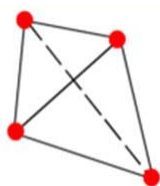
Суть МКЕ полягає в тому, що досліджувана область розбивається на кінцеві елементи, в кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції і потім знаходяться значення цих функцій на кордонах елементів.

Процес поділу моделі на малі частини називається **створенням сітки**.

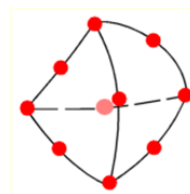
В SolidWorks Simulation використовуються **просторові, оболонкові, балкові і спеціальні сітки**.

¹ Відповіді на зазначені теоретичні питання занести в протокол при підготовці до виконання практичної роботи.

Просторові елементи застосовують для об'ємних тіл і утворюють сітку з тетрадральними твердотільними елементами для кожного твердого тіла і бувають двох типів:



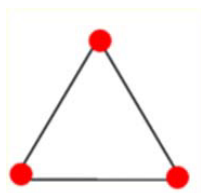
а



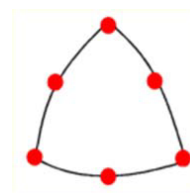
б

Рисунок 5.1 – Лінійний (а) та параболічний (б) просторовий елемент

Оболонкові елементи застосовують для тонкостінних деталей (з листового металу) і утворюють сітку з трикутними елементами і бувають також двох типів:



а



б

Рисунок 5.2 – Лінійний (а) та параболічний (б) оболонковий елемент

Балкові елементи застосовуються для моделей створених рухом постійного поперечного перерізу за деякою траєкторією, і визначається двома кінцевими точками і поперечним перерізом.

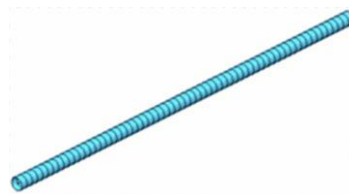
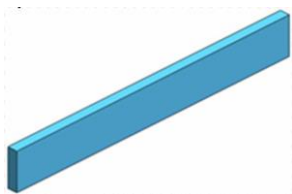


Рисунок 5.3 – Балковий елемент

Комбінована сітка автоматично застосовується, коли в моделі присутні різні геометричні форми.

Критерії міцності. Призначення критеріїв міцності, їх використання та інтерпретація результатів розрахунку напружено-деформованого стану тіла мають важливе значення при розрахунку.

Solidworks Simulation дозволяє оцінювати міцність виробів за чотирма критеріями:

- максимальні еквівалентні напруження по Мізесу;
- максимальні дотичні напруження;
- напруги Мора-Кулона;
- максимальні нормальні напруження.

Для моделей з композитними оболонками підтримуються додаткові критерії руйнування:

- критерій максимальної напруги;
- критерій руйнування Tsai-Hill;
- критерій руйнування Tsai-Wu.

Величина, що отримується розрахунком за критерієм міцності, має розмірність напруги $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$ або $1 \text{ МПа} = 1 \times 10^6 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{мм}^2$.

Критерій Мізесу

Критерій Мізеса (Von Mises) визначає момент вичерпання несучої здатності шляхом порівняння величини еквівалентної напруги з межею плинності матеріалу. Еквівалентне напруження в певній точці визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{VomMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги

Еквівалентне напруження не залежить від орієнтації майданчика (інваріантно).

Критерій Мізеса застосовується для ізотропних матеріалів, що мають в'язкий характер руйнування. До них відноситься більшість металів, а також деякі пластмаси, які мають лінійну ділянку на діаграмі деформування.

У деформованому тілі завжди можна виділити орієнтований елементарний паралелепіпед, по гранях якого діють нормальні (головні) напруги.

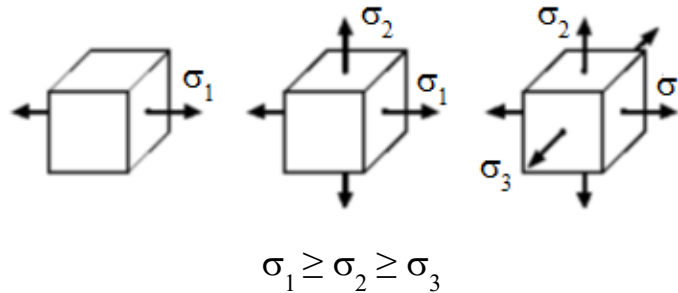


Рисунок 5.4 – Нормальні (головні напруги), що діють на грані паралелепіпеда

Критерій максимальних дотичних напружень

Критерій Максимальних дотичних напружень (критерій Тріска) полягає в порівнянні величини максимального дотичного напруження в даній точці з деякою, заданою користувачем, величиною.

$$\tau_{\max} = \max(\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31})$$

$$\text{де } \tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}$$

При чистому розтягуванні стисненні оцінка по Мізесу і по Максимальним дотичним напруженням тотожні. При чистому зсуві міцність по Мізесу більша приблизно на 15%.

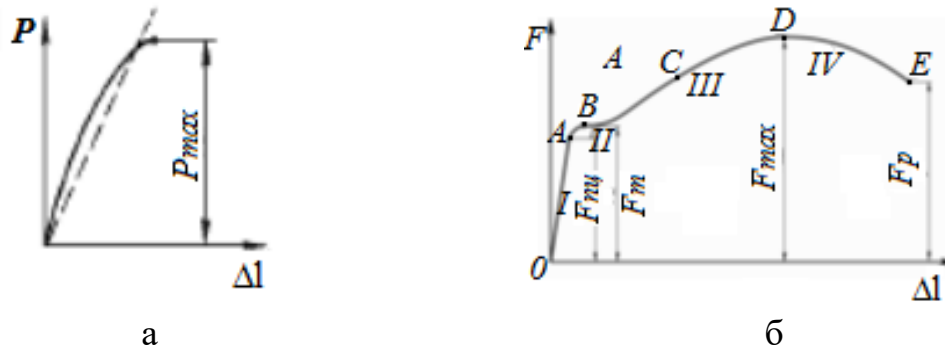
Коефіцієнт запасу для цього критерію подвоюється виходячи з припущення, що для тендітних матеріалів міцність при розтягуванні в два рази більше міцності при чистому зсуві.

Критерій Мора-Кулона

Критерій Мора-Кулона (критерій внутрішнього тертя) призначений для тендітних матеріалів, які по різному чинять опір напруженням розтягування і стиснення.

Оскільки крихкі матеріали не мають на кривій деформування вираженої ділянки текучості, то величина межі текучості SIGYLD не приймає участь в розрахунку. У властивостях матеріалу цю величину рекомендується ставити рівній нулю.

Коефіцієнт запасу залежить від першого і третього головних напружень.



I - ділянка пропорційності; II - ділянка текучості; III - ділянка самозміцнення; IV - ділянка руйнування.

Рисунок 5.5 – Графічне зображення критерію Мора-Кулона для крихкого (а) та пластичного (б) матеріалу

Критерій Максимальних нормальних напружень

Критерій Максимальних нормальних напружень призначений для тендітних матеріалів, однак чинять опір розтягуванню-стисненню. Так як ця умова рідко дотримується в чистому вигляді, наприклад тому, що дефекти у вигляді тріщин при розтягуванні набагато сильніше послаблюють конструкцію, ніж при стисканні, - цей критерій треба використовувати з великою обережністю.

Оскільки крихкі матеріали не мають на кривій деформування вираженої ділянки текучості, то величина межі текучості SIGYLD не приймає участь в розрахунку. У властивостях матеріалу цю величину рекомендується ставити рівній нулю. Коефіцієнт запасу міцності залежить від першої головної напруги.

Активация модуля Solidworks Simulation

Щоб почати користуватися пакетом Simulation необхідно додати його на панель керування. Для цього необхідно в меню «**Инструменты**» → «**Добавления**» (рисунок. 5.6) у вікні «**Добавления**» (рисунок. 5.7) відшукати пункт «**SolidWorks Simulation**» і встановити прапорці «**Активные добавления**» і «**Запуск**».

Перший прапорець – додавання пакету в програму, другий – здійснювання запуск пакету при запуску SolidWorks. Потім натисніть кнопку **ОК**.

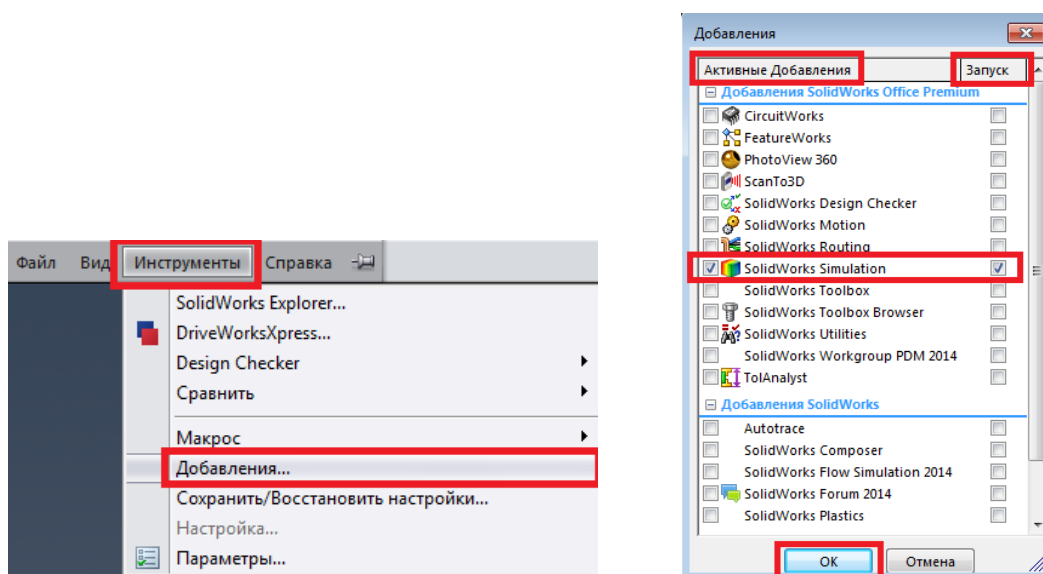


Рисунок 5.6 – Меню «**Инструменты**» → «**Добавления**»

Якщо процес додавання пройде успішно, то:

- в меню додається пункт Simulation;
- на панелі інструментів з'являється вкладка Simulation;
- в менеджері проекту SolidWorks з'являється вкладка з піктограмою продукту.

Интерфейс SolidWorks Simulation

Solidworks Simulation використовує стандартний Windows-інтерфейс і складається з **Меню** (рисунок. 5.7), **Панелі інструментів** (рисунок. 5.8) і **Дерева досліджень** (рисунок. 5.9).

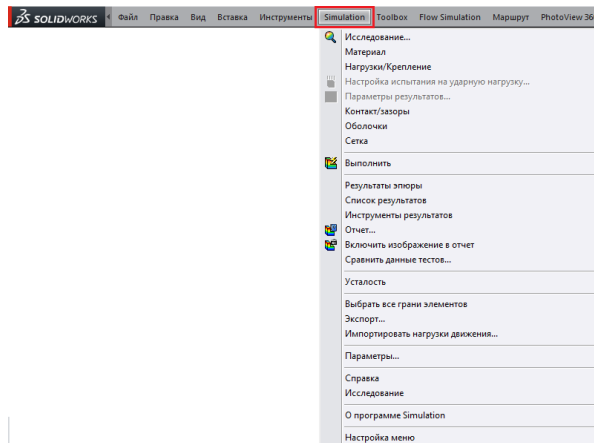


Рисунок 5.7 – Меню Solidworks Simulation

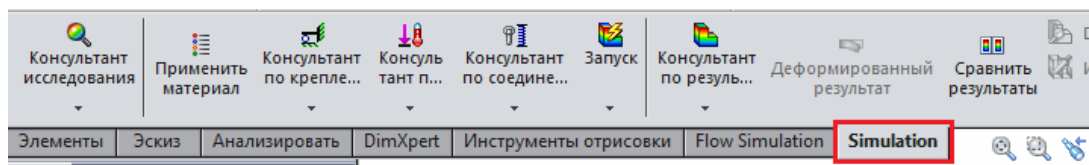


Рисунок 5.8 – Панель інструментів Solidworks Simulation

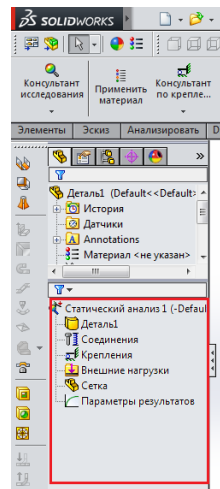


Рисунок 5.9 – Дерево досліджень

Вкладка Simulation в Менеджері команд відкриває набір інструментів, характерних для кожного з видів досліджень в Solidworks Simulation.

Перед початком роботи необхідно вибрати тип дослідження в **меню Simulation** (рисунок. 5.7) або в **Консультанті дослідження** (рисунок. 5.10).

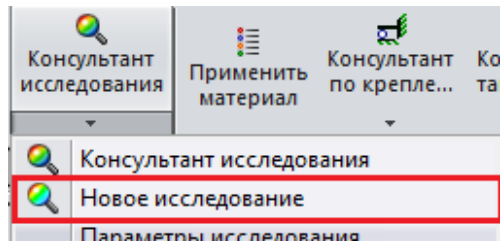


Рисунок 5.10 – Консультант дослідження

Після вибору пункту «**Новое исследование**» (рисунок. 5.7) активується меню «**Исследование**» (рисунок. 5.11).

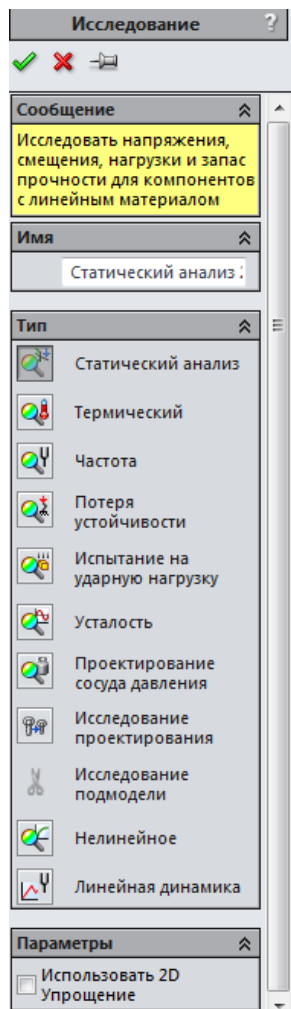


Рисунок 5.11 – Меню «**Исследование**»

Типи досліджень

Статичне дослідження обчислює переміщення, сили реакції, навантаження, напруги і розподіл запасу міцності.

Термічне дослідження підраховує температури, градієнт температури і тепловий потік на основі тепловиділення, теплопровідності, конвекції і умов випромінювання.

Частотне дослідження розраховує власні частоти і асоційовані форми коливань.

Дослідження втрати стійкості визначає миттєві великі переміщення, викликані осьовими навантаженнями.

Дослідження на ударне навантаження оцінює вплив падіння деталі / збірки на жорстку / пружну поверхню.

Дослідження втоми обчислює термін служби виробів в умовах втоми матеріалів на підставі інтенсивності напружень, напружень по Мізесу або максимальних головних знакозмінних напружень.

Дослідження конструкції посудини, що працює під тиском об'єднує результати статичних досліджень з необхідними коефіцієнтами.

Дослідження проектування забезпечує рівномірний робочий потік для досліджень оптимізації та оцінки.

Нелінійне дослідження вирішує завдання в нелінійній постановці, викликаній поведінкою матеріалу, великими переміщеннями і умовами контакту.

Лінійне динамічне дослідження виконує розрахунок в умовах інерційних і демпфуючих впливів.

Після вибору типу дослідження під Деревом конструювання з'являється вкладка з назвою дослідження (рисунок. 5.12).

Натискання по цій вкладці відкриває Менеджер дослідження.

Менеджер досліджень статичного аналізу має папки за замовчуванням **З'єднання, Кріплення, Зовнішні навантаження, Сітка і Параметри результатів**. Задані параметри дослідження потрапляють кожен в свою папку (рисунок. 5.12).

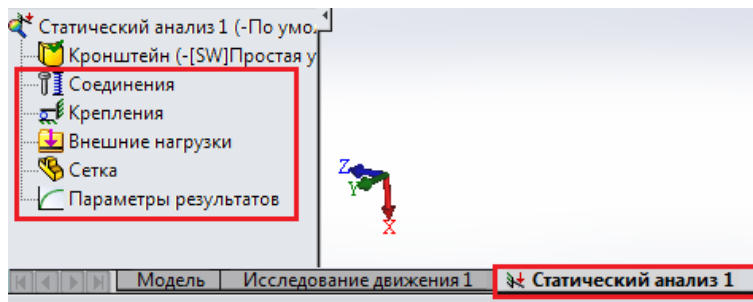


Рисунок 5.12 – Дерево досліджень статичного аналізу

Загальна концепція дослідження

Загальна послідовність статичного дослідження в Solidworks Simulation має на увазі наявність досліджуваної моделі і включає виконання наступних пунктів:

1. Завдання матеріалу деталі (збірки).
2. Накладення закріплень.
3. Завдання типів, місць прикладання і величин навантажень.
4. Визначення типу контакту і наборів контактів (для збірок).
5. Генерація сітки.
6. Виконання власне дослідження.
7. Перегляд і аналіз результатів дослідження, формування звіту.
8. Коригування моделі, граничних умов і повторний розрахунок (при необхідності).

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної практичної роботи рекомендується використати конспект лекцій з курсу та список рекомендованої літератури до даних методичних вказівок.

5.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

5.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у Додатку А.

5.4. Послідовність виконання практичної роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання (Додаток Б) в програмному комплексі SolidWorks виконати розрахунок деталі на міцність в САЕ системі SolidWorks Simulation. У процесі дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

- задати матеріал деталі;
- накласти закріплення і прикласти навантаження;
- створити сітку і запустити дослідження;
- проаналізувати результати дослідження і сформулювати звіт.

2. Після проведення розрахунків продемонструвати результати роботи викладачу.

3. Оформити протокол практичної роботи.

5.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:

- роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи;
- опис по етапах порядку виконання розрахунку деталі на міцність.

Приклад виконання практичної роботи.

Вихідні дані: Необхідно виконати розрахунок деталі (рисунок. 5.13) на міцність.

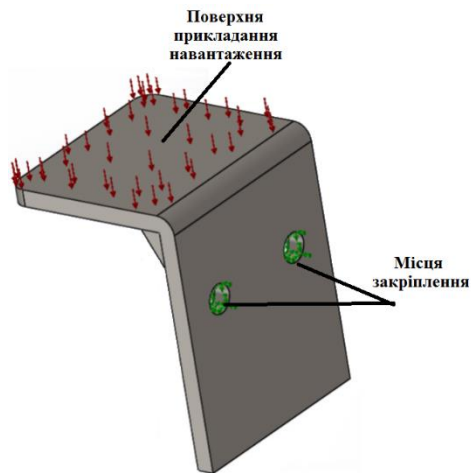


Рисунок 5.13 – Деталь із схемою закріплення та прикладення навантаження

Матеріал деталі – легована сталь

Величина сили, що прикладається – 400 Н.

Послідовність виконання дослідження:

1. Запустіть програмний комплекс SolidWorks.
2. Через меню «Файл» → «Открыть» відкрийте надану викладачем деталь.

3. В меню **Simulation** (рисунок. 5.14) або в «Консультант исследования» (рисунок. 5.15) виберіть тип дослідження – «Статический анализ».

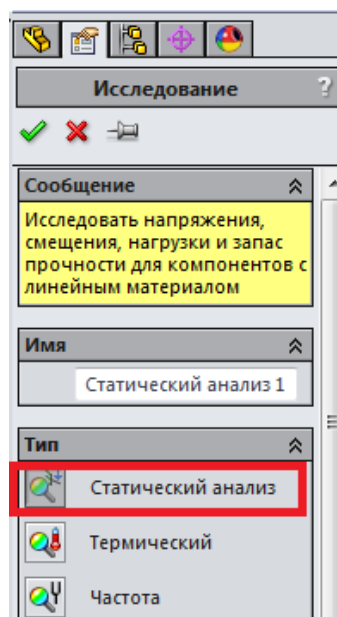



Рисунок 5.14 – «Консультант исследования»

4. Завдання матеріалу. В менеджері проекту задайте матеріал деталі – легована сталь. Це можна зробити натиснувши правою кнопкою миші (ПКМ) на піктограмі матеріалу  і в контекстному меню вибрати пункт «Редактировать материал». В результаті відкриється вікно «Материалы» в якому необхідно вибрати «Сталь» → «Легированная сталь» і натиснути «Применить».

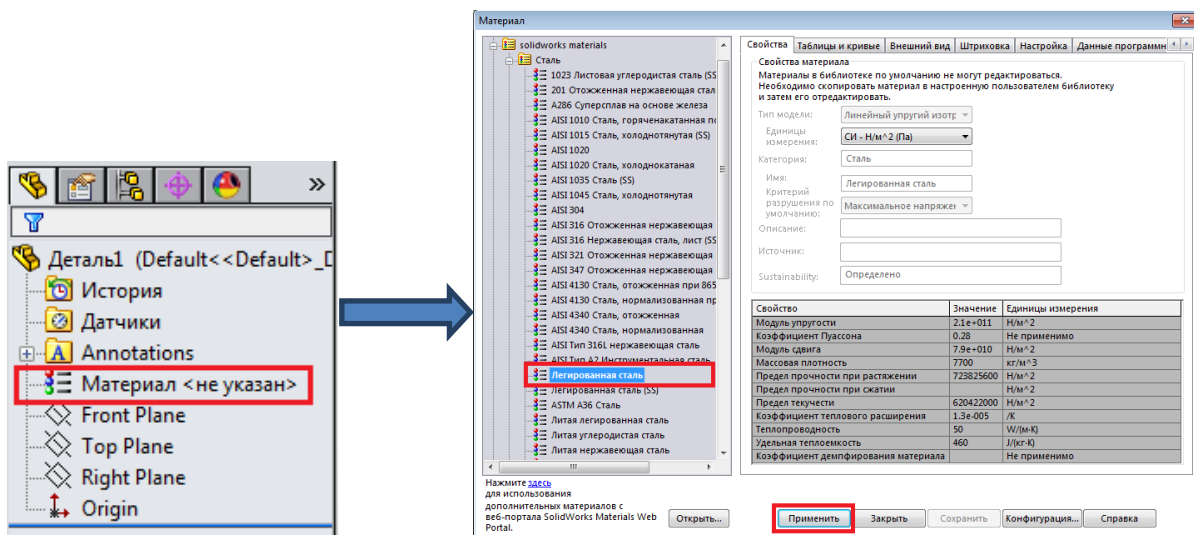




Рисунок 5.15 – Завдання матеріалу деталі

5. Закріплення деталі. Для закріплення деталі необхідно:

1) У Дереві дослідження Simulation натиснути ПКМ на «Крепления»

 та в контекстному меню вибрати пункт «Зафиксированная геометрия». В результаті з'явиться Менеджер властивостей «Крепление».

2) В графічній області вибрати поверхні двох отворів. Після цього в Менеджері властивостей «Крепление» в полі «Грани, Кромки, Вершины для крепления»  відобразяться вибрані «Грань <1>» і «Грань <2>».

3) Натиснути ОК .

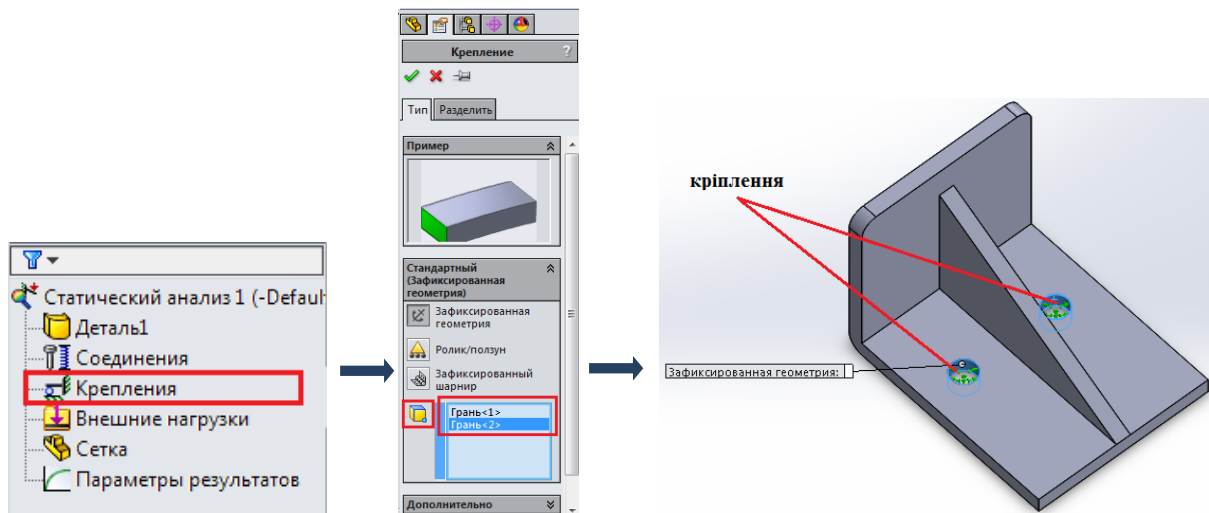







Рисунок 5.16 – Закріплення деталі

6. Прикладання навантаження до деталі. Для прикладання навантаження до деталі необхідно:

1) У *Дереві дослідження Simulation* натиснути ПКМ на «**Внешние нагрузки**»  і в контекстному меню вибираємо пункт «**Давление**» . В результаті з'явиться *Менеджер властивостей «Давление»*.

2) На вкладці «**Тип**» в розділі «**Тип**» вибрати «**Перпендикулярно выбранной грани**».

3) У розділі «**Значение давления**» вибрати **psi** в меню «**Единица измерения**»  і ввести значення тиску **400** в поле «**Значение давления**» .

4) У графічній області вибрати поверхню паралельну осям двох отворів. Після цього в *Менеджері властивостей «Давление»*. в полі «**Грани для давления**»  відобразиться вибрана грань.

5) Натиснути **ОК** .

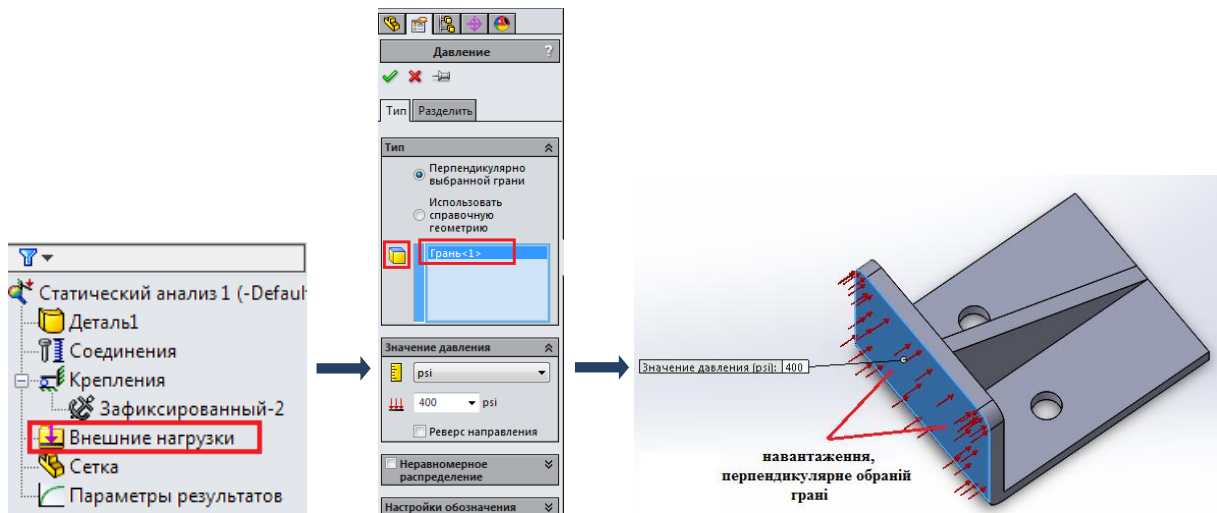




Рисунок 5.17 – Прикладання навантаження до деталі

7. Створення сітки. Для створення сітки необхідно:

1) У *Дереві дослідження* натиснути ПКМ по напису «Сетка»  і в контекстному меню вибрати пункт «Создать сетку» .

2) У розділі «**Параметры сетки**» вибрати «Стандартная сетка», «Глобальный размер» та «Допуск» будуть обчислені програмою.

5) У розділі «Дополнительно» для перевірки Якобіана встановити 4 точки, вибрати «Автоматические попытки для твердых тел» і задати «Число проб» рівним 3.

6) Натискаємо **ОК** .

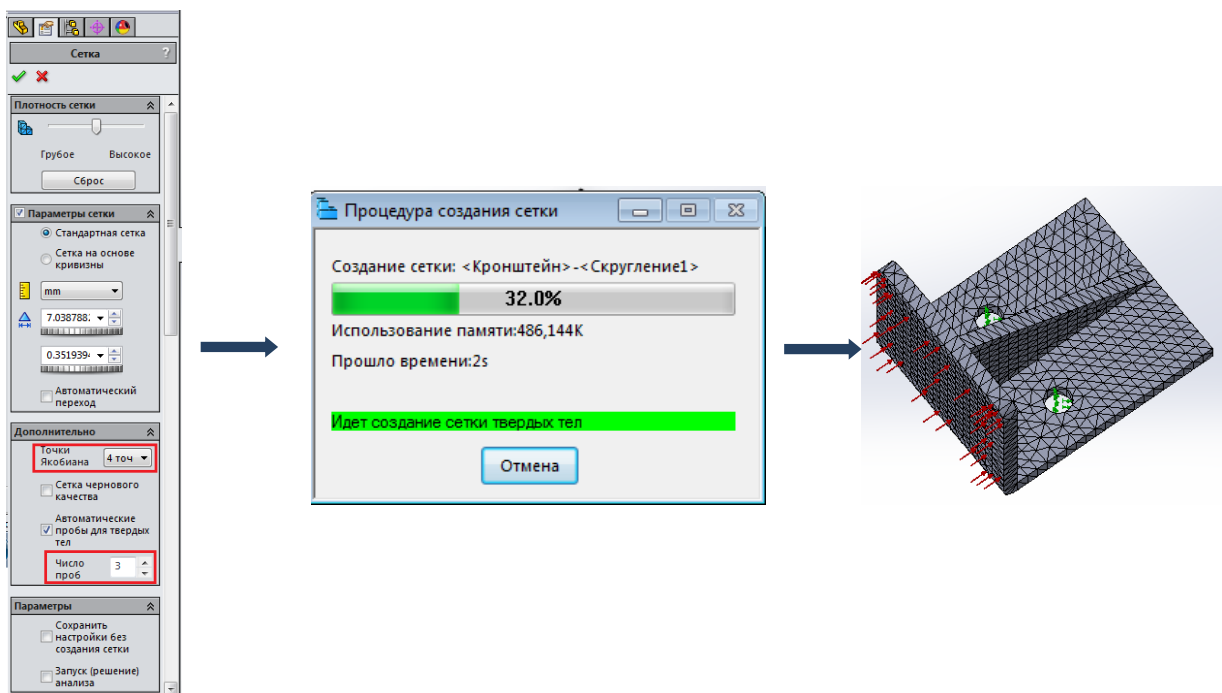



Рисунок 5.18 – Створення сітки

8. Запуск дослідження. Для запуску дослідження необхідно натиснути кнопку «**Запуск**»  на *панелі інструментів Simulation* (рисунок. 5.19). Після чого починається процес розрахунку по закінченню якого в Дереві дослідження Simulation з'являється папка «**Результаты**».

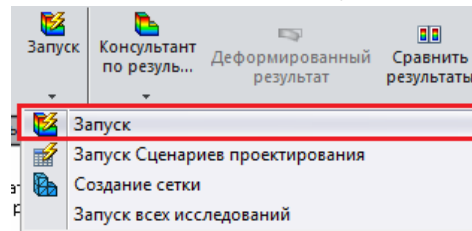


Рисунок 5.19 – Запуск дослідження

9. Результаты дослідження. Після успішного виконання дослідження в папці «**Результаты**» створюються епюри з результатами рішення. Характерними епюрами є **Напруження**, **Переміщення** і **Деформації**. Додаткові епюри можна відобразити в меню після клацання ПКМ на папці «**Результаты**».

Нижче наведені результати дослідженняю

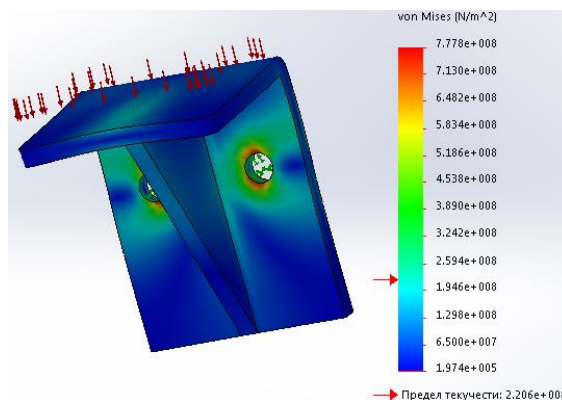


Рисунок 5.20 – Епюра еквівалентних напружень

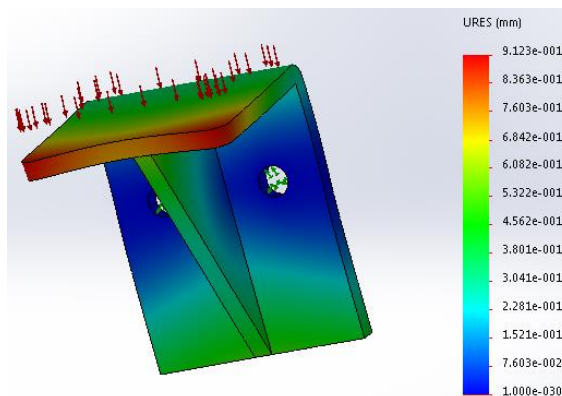


Рисунок 5.21 – Епюра результуючих переміщень

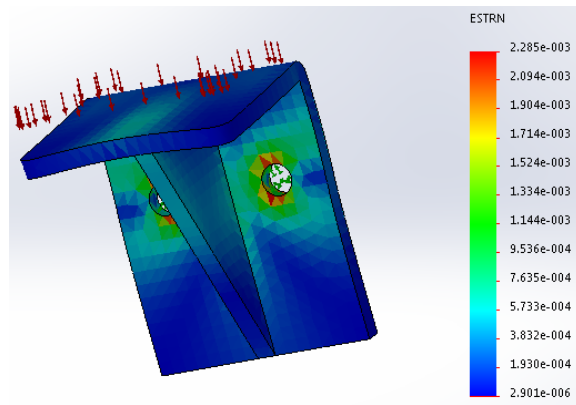


Рисунок 5.22 – Епюра еквівалентних деформацій

10. Епюра розподілу запасу міцності. Для визначення епюри перевірки запасу міцності натисніть ПКМ на «Результаты» і виберіть «**Определить эпюру проверки запаса прочности**» (рисунок. 5.23).

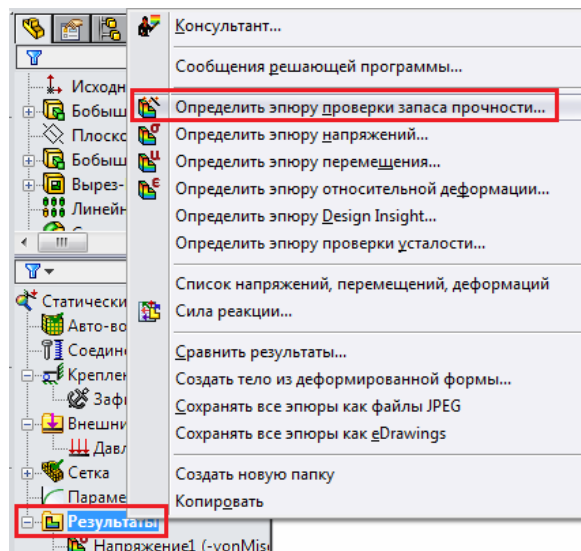


Рисунок 5.23 – Додавання епюри перевірки запасу міцності

Відкривається *менеджер властивостей «Запас прочности»*, який пропонує виконати 3 кроки для оцінки коефіцієнта запасу міцності (рисунок. 5.24).

Для побудови епюри розподілу запасу міцності використано максимальну напругу по Мізесу і встановлено межу напружень як для межі плинності.

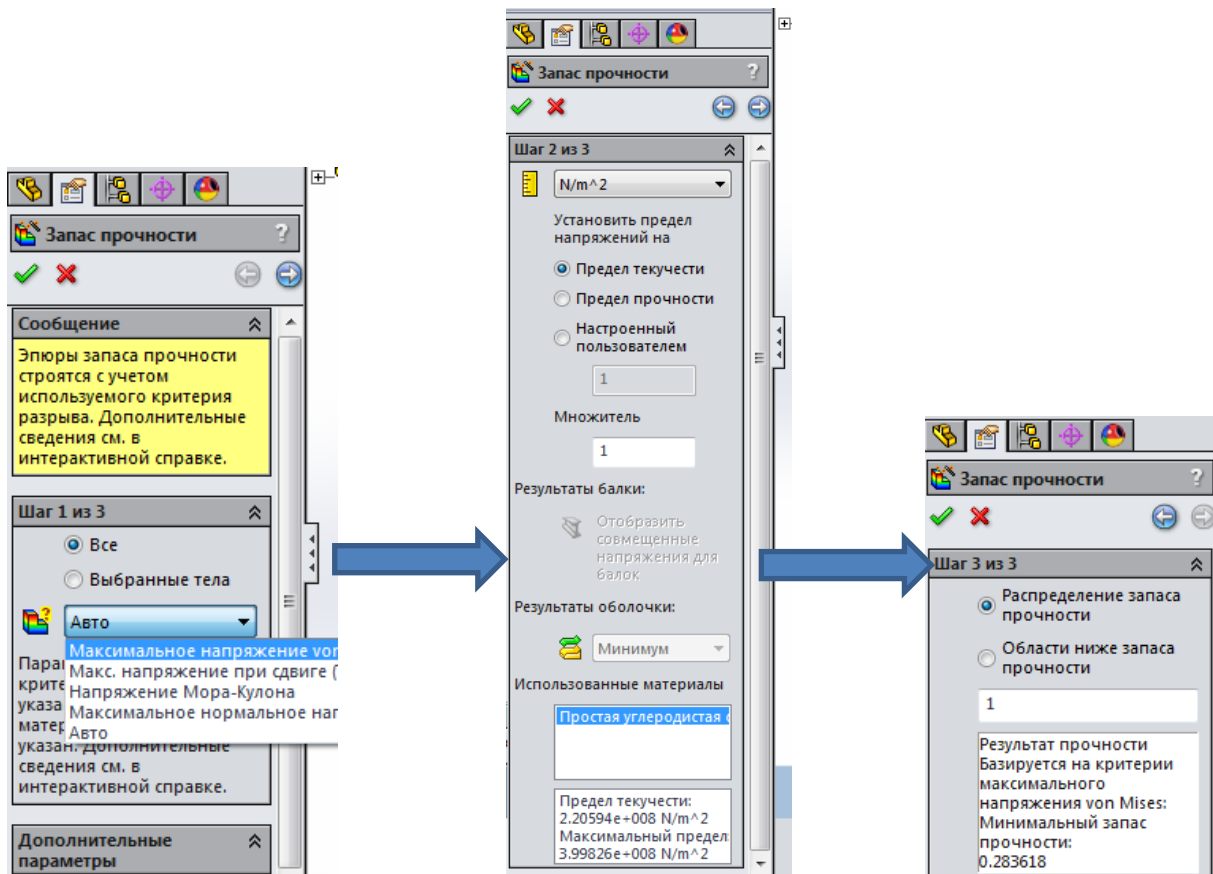


Рисунок 5.24 – Три кроки менеджера властивостей «Запас прочности»

Після проходження трьох кроків менеджера властивостей «Запас прочности» створюється еюра розподілу коефіцієнта запаса міцності (рисунок. 5.25)

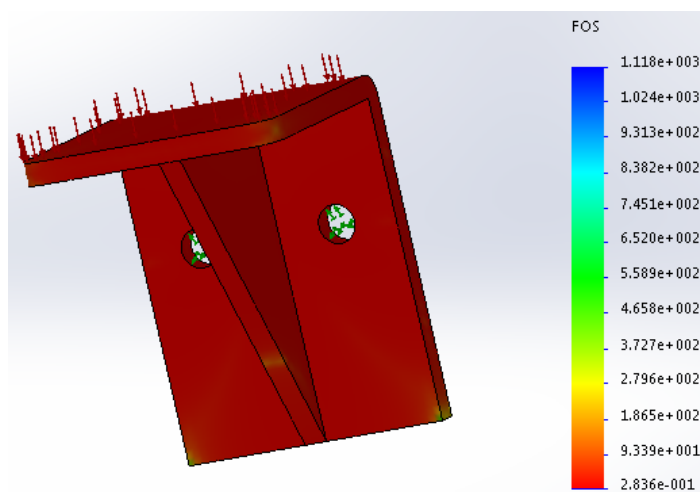


Рисунок 5.25 – Еюра розподілу коефіцієнта запаса міцності

11. Звіт дослідження. Створити **звіт дослідження** можна вибравши в меню Simulation пункт **«Отчет»** або натиснувши кнопку на панелі інструментів. В результаті з'явиться діалогове вікно **«Параметры отчёта»**.

У діалоговому вікні **«Параметры отчёта»** можна вказати розділи, які повинні міститися в звіті, дані заголовка, а також вказати папку, в яку будуть зберігатися звіти в полі **«Путь отчёта»**. Після визначення всіх параметрів натискання кнопки **«Опубликовать»** створює звіт в форматі Microsoft Word.

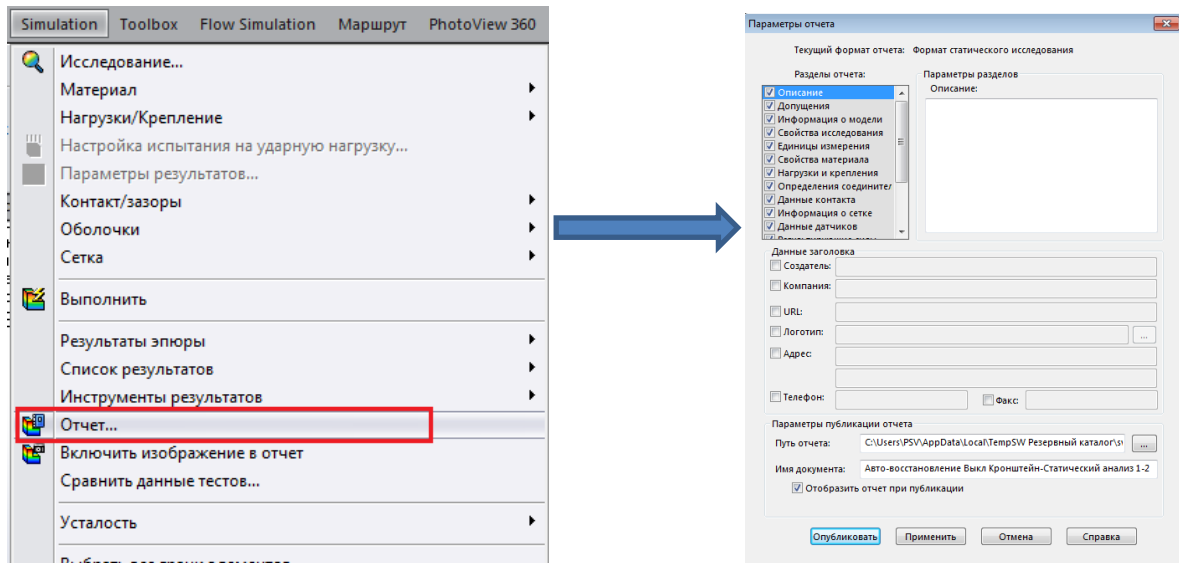


Рисунок 5.26 – Створення звіту дослідження

5.6. Контрольні запитання

1. Опишіть основні елементи інтерфейсу SolidWorks Simulation. Як активувати SolidWorks Simulation?
2. Дайте визначення методу кінцевих елементів (МКЕ) та розкрийте його суть.
3. Які критерії міцності застосовуються в SolidWorks Simulation?
4. Які типи досліджень використовуються SolidWorks Simulation?
5. Що таке граничні умови та як вони задаються?
6. Які групи кріплень розрізняють в Solidworks Simulation?
7. Які числові методи використовуються для знаходження розв'язків алгебраїчних рівнянь в Solidworks Simulation?

Практична робота №6

Розрахунок аеродинамічних характеристик авіаційного профілю в SolidWorks Flow Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички виконання розрахунку аеродинамічних характеристик авіаційного профілю в SolidWorks Flow Simulation.

Завдання¹. Ознайомитися із поняттям аеродинамічний коефіцієнт опору та підйомної сили, число Маха, швидкість звука в повітрі.

6.1. Короткі теоретичні відомості

Flow Simulation може використовуватися для вивчення потоку навколо об'єктів та визначення результуючої підйомної сили, а також сил опору об'єктів, обумовлених потоком.

В даній роботі ми будемо використовувати Flow Simulation для визначення підйомної сили і сили опору аеродинамічного профілю на різних швидкостях польоту, поміщеного в однорідний потік текучого середовища. Авіаційний профіль розташований перпендикулярно до потоку.

Аеродинамічні коефіцієнти опору C_x та підйомної сили C_y розраховуються за формулою:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad \text{та} \quad C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho v^2 S}$$

де

F_x – сила лобового опору, Н; F_y – підйомна сила, Н; ρ – густина повітря, кг/м³ (при температурі $T = 293.2$ К та тиску $P = 101325$ Па), v – швидкість набігаючого на крило повітря, м/с; S – площа поверхні крила, м².

Число Маха (M) – це відношення швидкості течії в даній точці газового потоку до місцевої швидкості поширення звуку в середовищі, що

¹ Відповіді на зазначені теоретичні питання занести в протокол при підготовці до виконання практичної роботи.

рухається. В авіації швидкість Маха визначається як швидкість, з якою повітря обтікає, літак, поділена на швидкість звуку в цій речовині в цих умовах.

Швидкість звуку – швидкість розповсюдження пружних хвиль у середовищі - як поздовжніх у газах, рідинах і твердих тілах, так і поперечних (зсувних) у твердих середовищах. Визначається пружністю і щільністю середовища. Швидкість звуку в газах, рідинах і ізотропних твердих середовищах зазвичай є незмінною для даної речовини. Як правило, у газах швидкість звуку менша, ніж в рідинах, а в рідинах швидкість звуку менша, ніж у твердих тілах, тому при зріджуванні газу швидкість звуку зростає. У широкому розумінні звукові хвилі – це будь-які механічні хвилі (тобто хвилі в пружних середовищах). У вузькому значенні звук – це такі пружні хвилі, дія яких створює у людини слухові відчуття. Швидкість поширення звука в повітрі при нормальних умовах ((при температурі $T = 293.2 \text{ K}$ та тиску $P = 101325 \text{ Па}$)) становить 343 м/с

$$v = 343 \cdot M$$

6.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

6.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у Додатку А.

6.4. Послідовність виконання роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання (Додаток В) в програмному комплексі SolidWorks виконати розрахунок двох режимів польоту **A** та **B**, кожному з яких відповідає своє число Маха.
2. Визначенню підлягає Нормальні зусилля в напрямках X та Y.
3. Текуче середовище – повітря при стандартних атмосферних умовах $T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 101325 \text{ Па}$, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, швидкість звука в повітрі 343 м/с. Площа поверхні крила становить 5 м^2 (ширина 1 м, довжина 5 м).
4. Числа Маха для розрахунку встановлюються відповідно до отриманого варіанту завдання.
5. В результаті розрахунків включити Епюри (Cut Plots) Тиску (Pressure) та Швидкості X (Velocity X).
6. Продемонструвати результати роботи викладачу.
7. Оформити протокол практичної роботи.

6.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:
– роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи.

Приклад виконання практичної роботи.

Вихідні данні: Необхідно виконати розрахунок двох режимів польоту **A** та **B**, кожному з яких відповідає своє число Текуче середовище – повітря при стандартних атмосферних умовах $T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 101325 \text{ Па}$, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, швидкість звука в повітрі 343 м/с. Площа поверхні крила становить 5 м^2 .

Профіль	Число Маха для режимів	
	A	B
DFS-761	0,25	0,60

1. Підготовка моделі. Для підготовки моделі до дослідження необхідно:
1) Запустити програмний комплекс SolidWorks.
2) Через меню «Файл» → «Открыть» відкрити надану викладачем модель.

2. Створення проекту. Для створення проекту необхідно:
1) В меню **Flow Simulation** або в **Менеджері команд** вибрати «Проект» (Project) → «Мастер проекта» (Wizard)

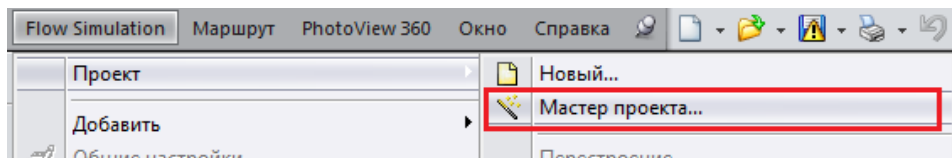


Рисунок 6.1 – Створення нового проекту

2) У вікні «Мастер проекта» (Wizard), що з'явиться, необхідно вказати ім'я проекту **М 0.25**, ім'я конфігурації **Вихідна конфігурація** та вибрати конфігурацію «Создать новую» (Create new) і натиснути кнопку «Далее».
Flow Simulation створить нову конфігурацію і збереже всі дані в новій папці.

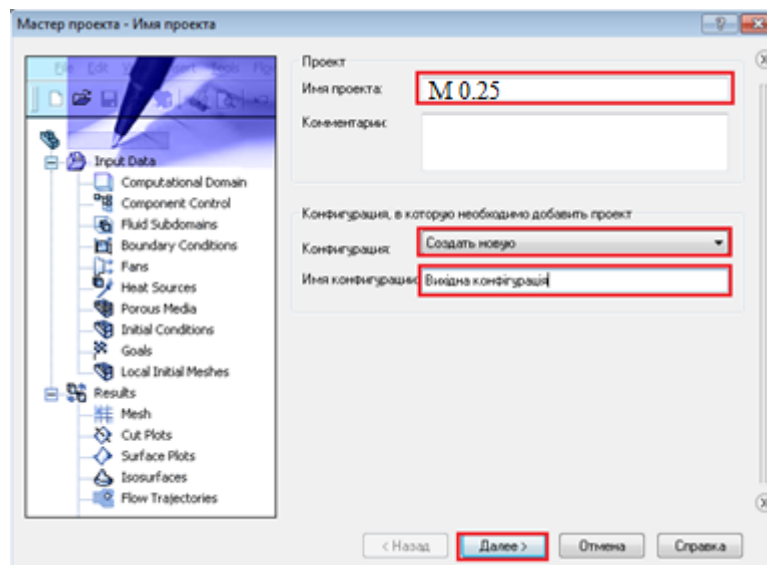


Рисунок 6.2 – Вікно «Мастер проекта» (Wizard)

3. Завдання системи одиниць вимірювання.
1) У вікні «Система единиц измерения» (Unit System) вибираємо міжнародну SI систему за умовчанням і натискаємо кнопку «Далее» (Next).

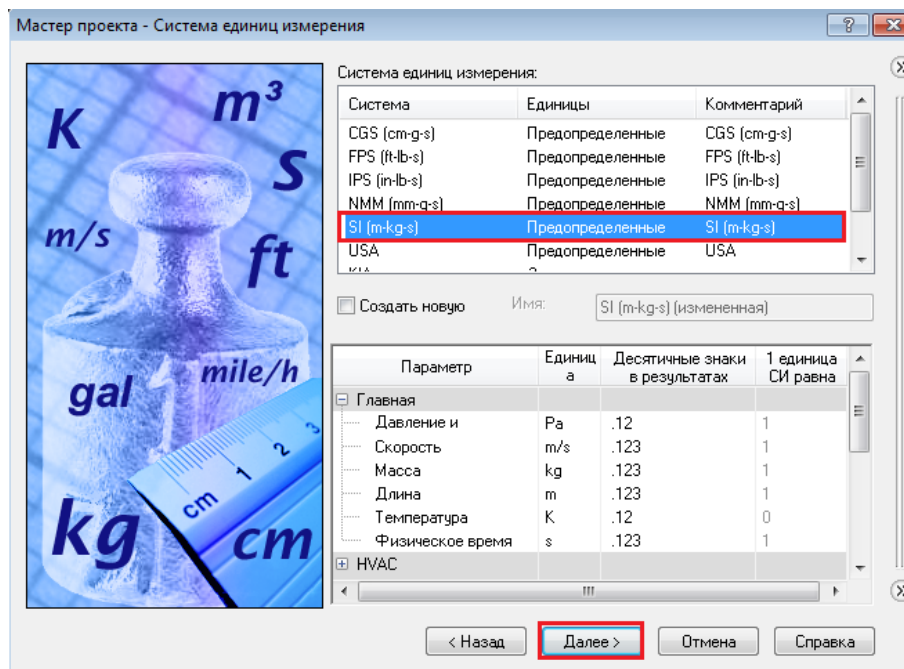


Рисунок 6.3 – Вікно «Система единиц измерения»

4. Вибір типу аналізу.

У вікні «Тип задачі» (Analysis Type) необхідно включити перемикач «Внешняя» (External) і натискаємо кнопку «Далее» (Next).

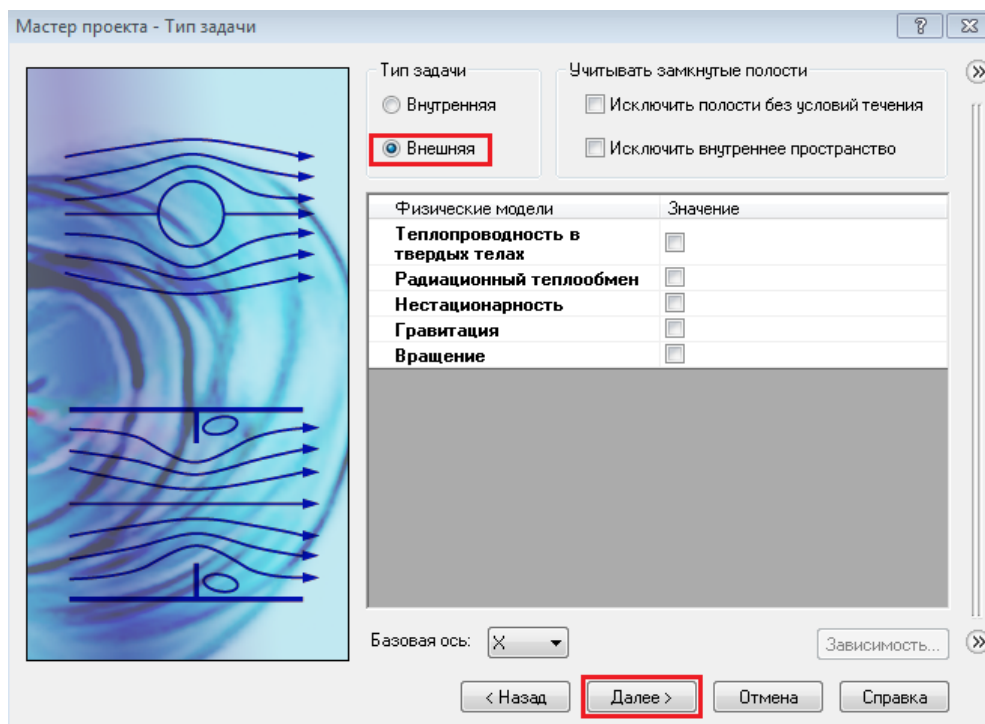


Рисунок 6.4 – Вікно «Тип задачі»

5. Вибір текучого середовища.

У вікні «Текучая среда» (**Default Fluid**) необхідно вибрати в якості текучого середовища «Воздух» (**Air (Gases)**). Для цього необхідно розкрити розділ «Газы» (**Gases**) – «Предопределенные» **Pre-Defined** та двічі натиснути **Air** і натискаємо кнопку «Далее» (**Next**).

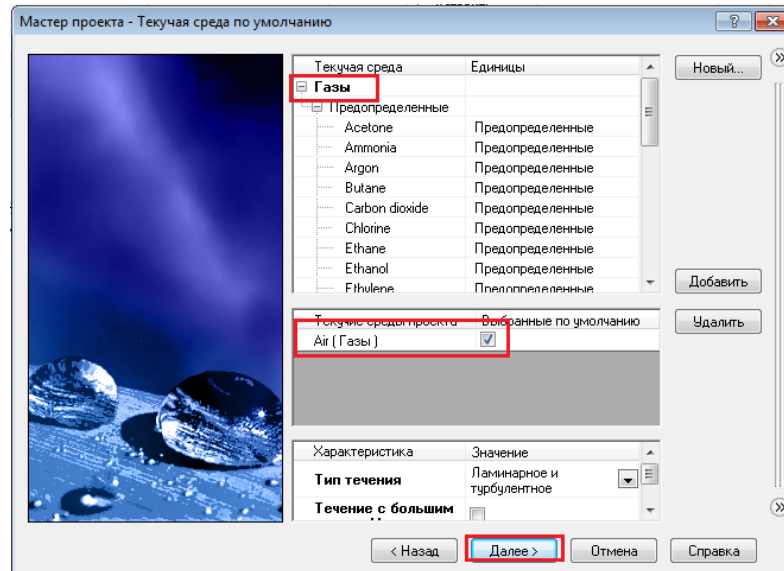


Рисунок 6.5 – Вікно «Текучая среда по умолчанию»

6. Завдання умов на стінках.

У вікні «Условия на стенках по умолчанию» (**Wall Conditions**) можна вказати стан теплової стіни за умовчанням, який застосовується до всіх стінок моделі, що контактує з поточним середовищем. У цьому проекті ми залишимо значення за замовчуванням «Адиабатическая стенка» (**Adiabatic wall**), що означає, що всі стінки моделі теплоізолювані, і залишимо нульову шорсткість стін. Натискаємо кнопку **Next**.

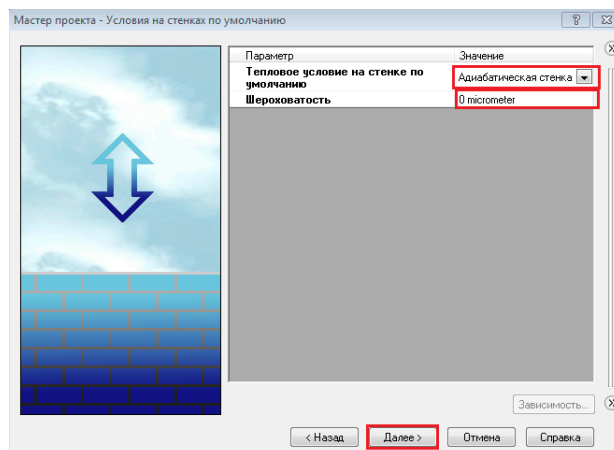


Рисунок 6.6 – Вікно «Условия на стенках по умолчанию»

7. Завдання початкових та зовнішніх умов.

1) У вікні «Начальные и внешние условия» (**Initial and Ambient Conditions**) вказуються зовнішні умови незбуреного потоку, що набігає. Таким чином, ми вказуємо початкові умови всередині обчислювальної області (**Computational Domain**) та граничні умови на межах обчислювальної області. Зовнішніми умовами є термодинамічні параметри (статичний тиск та температура за замовчуванням), швидкість та параметри турбулентності.

У цьому проекті ми розглянемо потік з термодинамічних умов за замовчуванням (тобто типові атмосферні параметри на рівні моря), і встановимо вхідний швидкісний потік (X-складова) відповідно до бажаного числа Маха. Для зручності ми можемо використовувати вікно «Зависимость» (**Dependency**), щоб вказати вхідний швидкісний потік, залежно від числа Маха.

2) Виділимо рядок «Скорость в направлении X» (**Velocity in X direction**). Кнопка «Зависимость» (**Dependency**) стане активною.

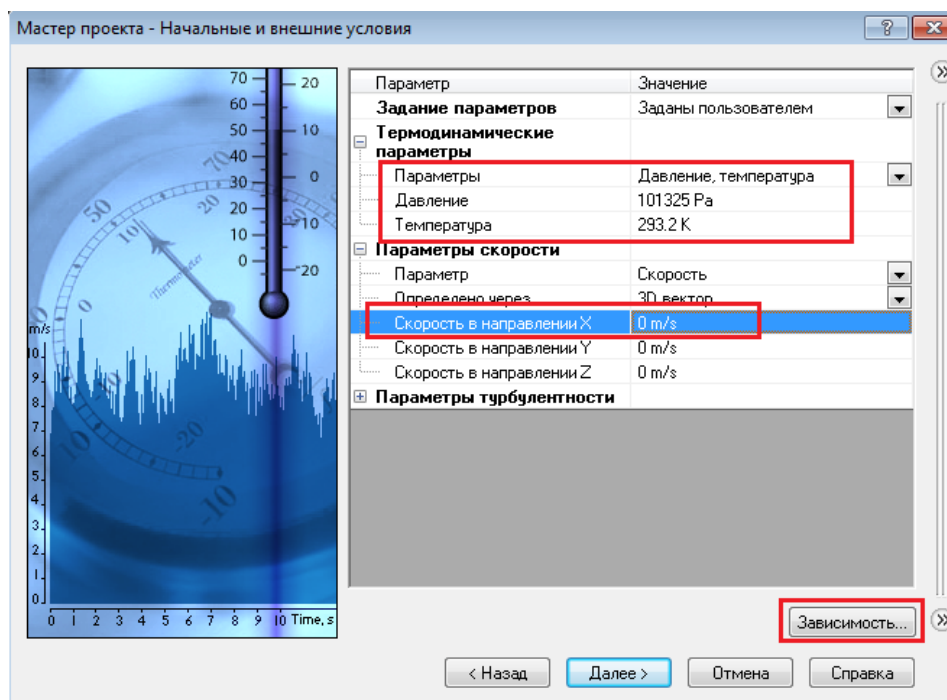


Рисунок 6.7 – Вікно «Начальные и внешние условия»

3) Натискаємо кнопку «Зависимость» (**Dependency**). З'явиться діалогове вікно «Зависимость» (**Dependency**). У списку «Тип зависимости» (**Dependency type**) вибираємо «Задание формулой» (**Formula Definition**). У рядку «Формула» (**Formula**) вводимо формулу для визначення швидкості потоку в залежності від числа Маха: $343 \cdot 0.25$. Натискаємо **ОК**. У вікні «Начальные и внешние условия» (**Initial and Ambient Conditions**) натискаємо «Далее».

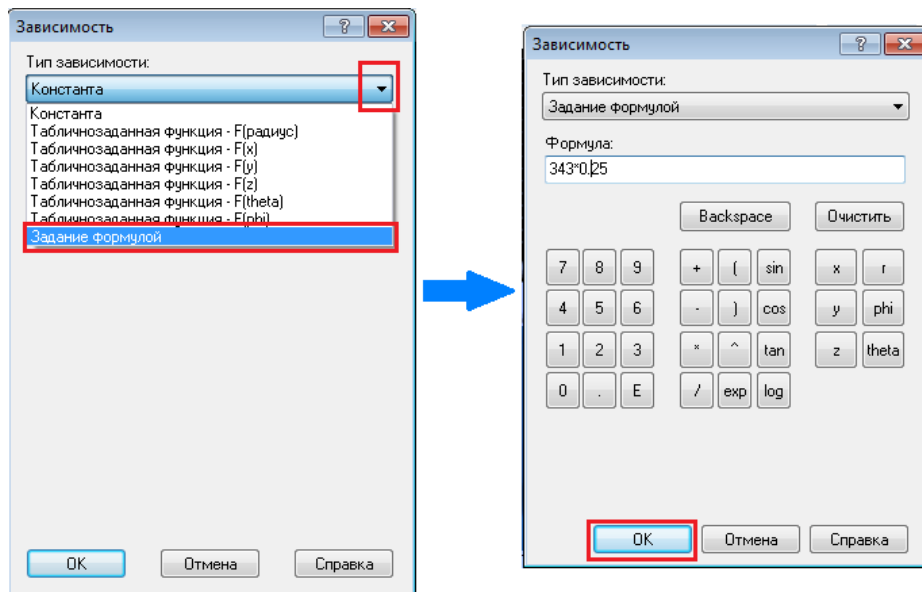


Рисунок 6.8 – Завдання швидкості потоку

8. Встановлення дозволів та параметри геометрії.

У вікні «Уровень разрешения» (**Result and Geometry Resolution**) вказуємо рівень вирішення результату 7, а усі інші значення залишити за замочуванням.

Після натискання кнопки «Завершение» (**Finish**) Flow Simulation створює нову конфігурацію Початкова конфігурація і автоматично згенерується тривимірна обчислювальна область.

У цьому прикладі ми зацікавлені лише у визначенні коефіцієнта опору та підйомної сили аеродинамічного профілю без додаткових 3D ефектів. Тому, щоб скоротити необхідну пам'ять комп'ютера та час CPU, у цьому прикладі ми виконаємо двовимірне (2D) дослідження.

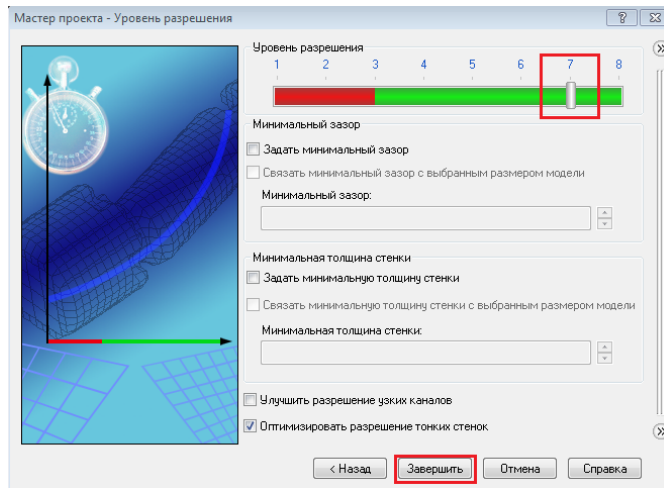


Рисунок 6.9 – Вікно «Уровень разрешения»

9. Вказування 2D площини потоку. Для вказування 2D площини потоку необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на піктограмі «Расчетная область» (**Computational Domain**) і вибрати пункт «Изменить» (**Edit Definition**). З'явиться діалогове вікно «Расчетная область» (**Computational Domain**).

2) Натиснути на «2D моделирование» та вибрати «XY плоскость».

3) У розділі «Размеры и условия» для вісі «X» ставимо значення 0,5 м та -0,5 м (так як ширина крила становить 1 м), для вісі «Y» ставимо значення 0,5 м та -0,5 м та для вісі «Z» ставимо значення 2,5 м та -2,5 м (так як довжина крила становить 5 м)

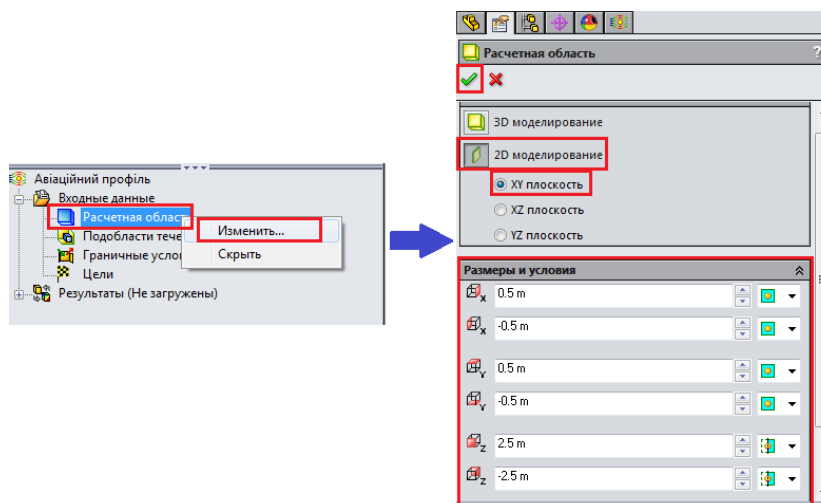


Рисунок 6.10 – Вказування 2D площини потоку

10. Встановлення глобальних цілей. Для того, щоб вказати глобальні цілі необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить глобальные цели» (Insert Global Goals).

2) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець Max для рядка «Скорость (X)» (X - Component of Rate), «Скорость (Y)» (Y - Component of Rate), «Скорость (Z)» (Z - Component of Rate), «Сила (X)» (X - Component of Force), «Скорость (Y)» (Y - Component of Force).

3) Натиснути ОК .

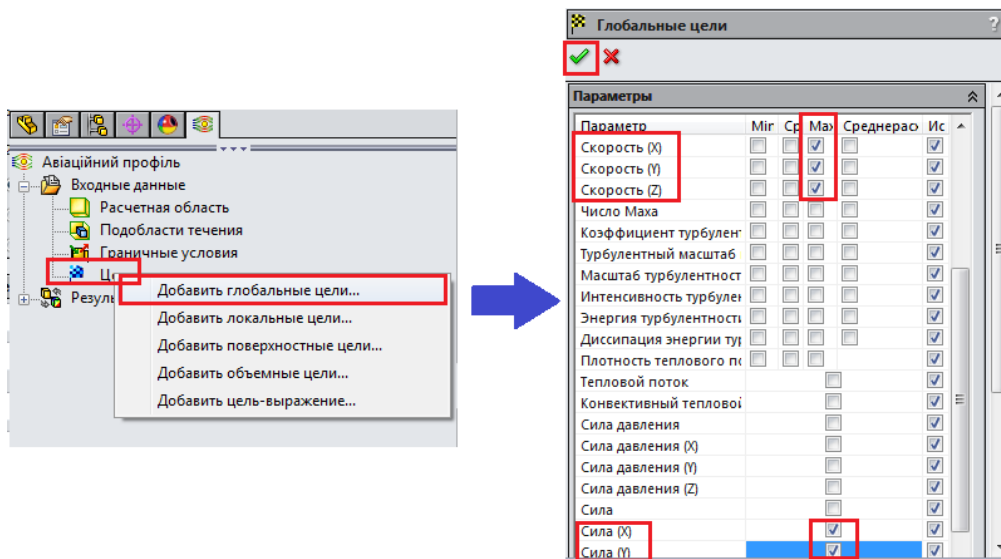


Рисунок 6.11 – Встановлення глобальних цілей

11. Встановлення цілей, що керуються рівнянням. Для того, щоб вказати цілі, що керуються рівнянням, необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить цель-выражение» (Insert Equation Goals).

2) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «ГЦ Сила (X) 1». Він з'явиться у графі «Выражение» (Expression).

3) Використовуючи кнопки на калькуляторі або клавіатуру, завершити вираз таким чином:

$$\{\text{ГЦ Сила (X) 1}\} * 2 / (1.2 * (343 * 0.25)^2 * 5)$$

4) У списку «Размерность» (Dimensionality) виберіть «Безразмерный» (No units) та натисніть ОК .

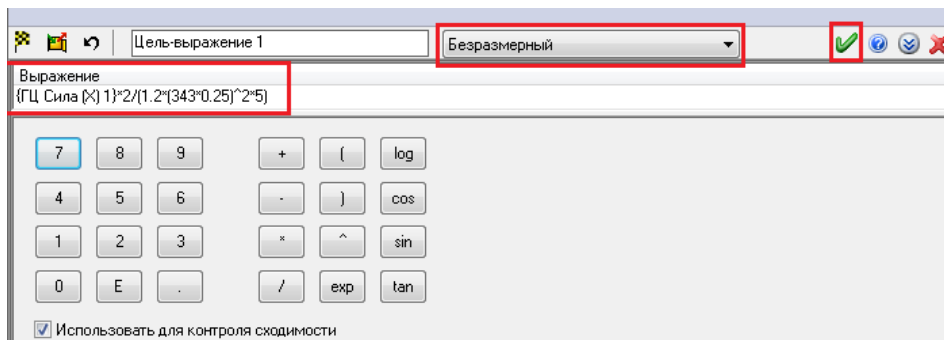


Рисунок 6.12 – Встановлення цілей, що керуються рівнянням

5) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить цель-выражение» (Insert Equation Goals).

6) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «ГЦ Сила (Y) 1». Він з'явиться у графі «Выражение» (Expression).

7) Використовуючи кнопки на калькуляторі або клавіатуру, завершити вираз таким чином:

$$\{\text{ГЦ Сила (Y) 1}\} * 2 / (1.2 * (343 * 0.25)^2 * 5)$$

8) У списку «Размерность» (Dimensionality) вибрати «Безразмерный» (No units) та натиснути ОК .

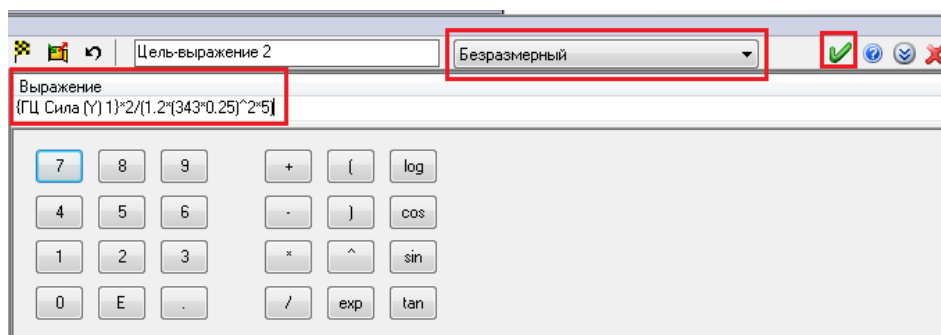


Рисунок 6.13 – Встановлення цілей, що керуються рівнянням

9) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» з'являться нові елементи «Цель-выражение 1» (Equation Goal 1) та «Цель-выражение 2» (Equation Goal 2).

10) Перейменувати «Цель-выражение 1» (Equation Goal 1) та «Цель-выражение 2» (Equation Goal 2) у C_x та C_y відповідно.

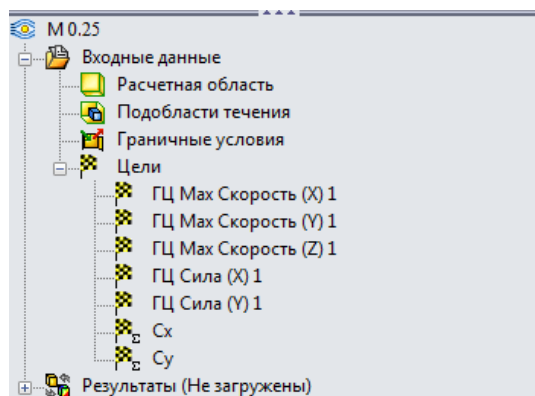


Рисунок 6.14 – Цілі проекту

12. Клонування проекту та створення нової конфігурації. Для клонування проекту необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на верхній іконці **M 0.25** і вибрати «Клонировать проект» («Clone Project»).

2) У рядку «Имя проекта» (Configuration name) ввести **M 0.6**.

3) Натиснути **ОК** . Буде створено нову конфігурацію **M 0.6** із прикріпленням до неї проектом **Flow Simulation**.

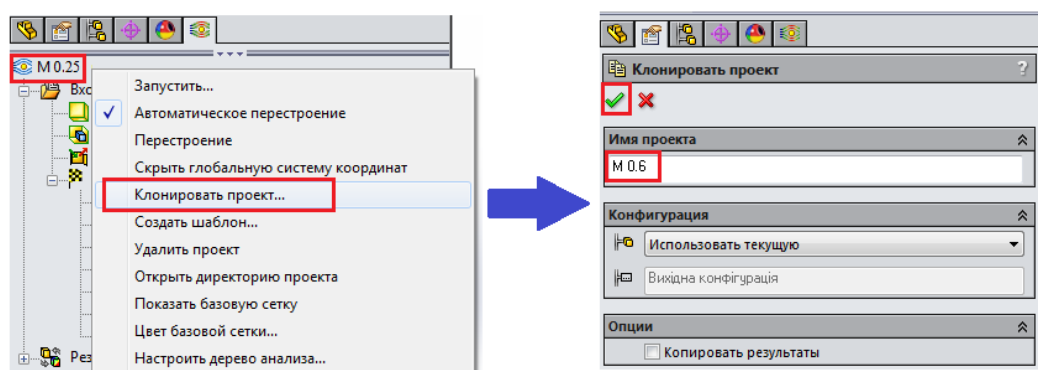


Рисунок 6.15 – Клонування проекту

13. Зміна налаштувань клонованого проекту. Щоб змінити налаштування необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation**→«Общие настройки» (**General Settings**). З'явиться діалогове вікно «Общие настройки» (**General Settings**).
- 2) У навігаторі натиснути «Начальные и внешние условия» (**Initial and ambient conditions**).
- 3) Перейти до рядка «Скорость в направлении X» (**Velocity in X direction**) і натиснути «Зависимость» (**Dependency**).
- 4) У рядку «Формула» (**Formula**) ввести нову формулу для визначення швидкості потоку в залежності від числа Маха: $343*0.60$. Натиснути **OK**, щоб повернутися до діалогового вікна «Общие настройки» (**General Settings**).
- 5) Натиснути **OK**, щоб зберегти зміни та закрити діалогове вікно «Общие настройки» (**General Settings**).

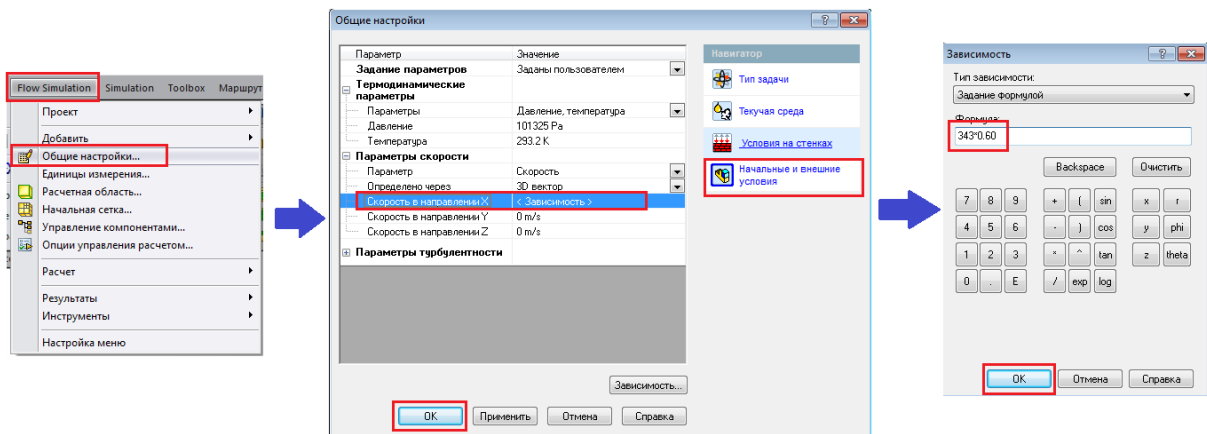


Рисунок 6.16 – Зміна налаштувань клонованого проекту

14. Зміна цілі, що керується рівнянням. Щоб змінити цілі необхідно:

- 1) Натиснути ПКМ на іконці C_x в розділі «Цели» (**Goals**) і вибрати «Изменить» (**Edit Definition**).
- 2) У графі «Выражение» (**Expression**) ввести нову формулу для нового числа Маха:
$$\{\text{ГЦ Сила (X) 1}\} * 2 / (1.2 * (343 * 0.60)^2 * 5)$$
- 3) У списку «Размерность» (**Dimensionality**) вибрати «Безразмерный» (**No units**) та натисніть **OK** ✓.
4. Аналогічні дії повторюємо й для C_y .

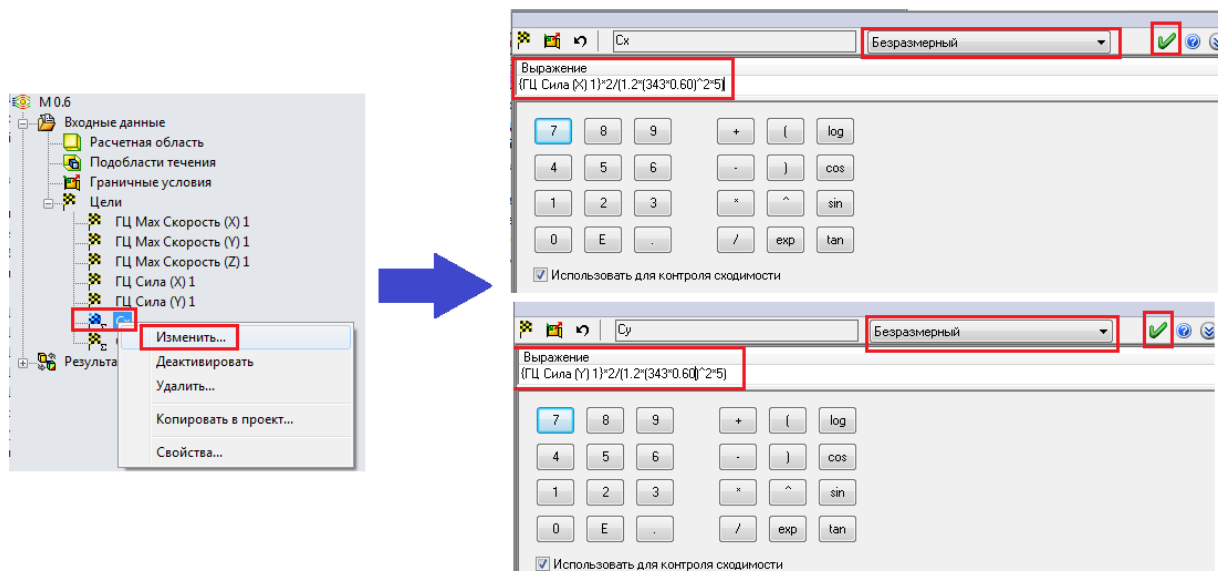


Рисунок 6.17 – Зміна цілі, що керується рівнянням

15. Створення шаблону. Щоб створити шаблон необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Проект» (**Project**) → «Создать шаблон» (**Create Template**). З'явиться діалогове вікно «Создать шаблон» (**Create Template**).

2) У рядку «Имя шаблона» (**Template name**) ввести **Аеродинамічний профіль**.

3) Натиснути «Сохранить» (**Save**). Буде створено новий шаблон **Flow Simulation**.

4) Зберегти модель

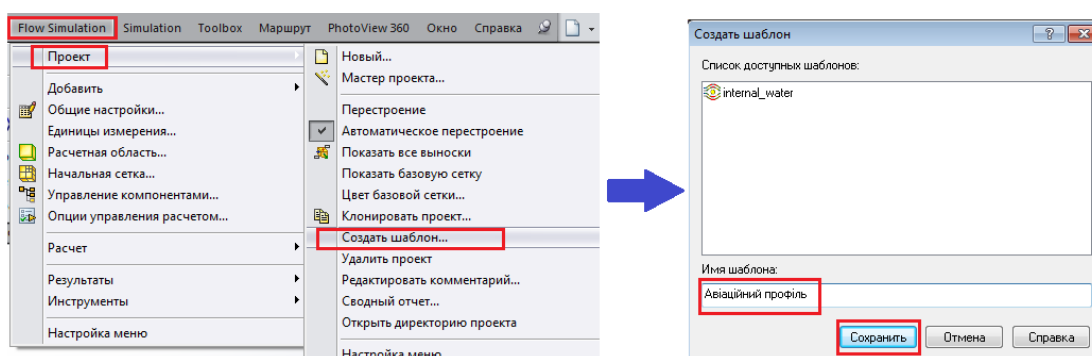


Рисунок 6.18 – Створення шаблону

16. Вирішення декількох проектів.

Flow Simulation дозволяє автоматично вирішувати низку проектів, що існують у будь-якому відкритому в даний момент документі.

1) Натисніть **Flow Simulation**→«Расчет» (Solve)→ «Серия расчетов» (Batch Run).

2) Активуйте стовпець «Расчет» (Solve) для рядка «Все проекты» (All projects), щоб вибрати рішення (Solve) всіх проектів. Також активуйте стовпець «Закреть окно наблюдения за расчетом» (Close Monitor) для рядка «Все проекты» (All projects). Коли опція «Закреть окно наблюдения за расчетом» (Close Monitor) активна, **Flow Simulation** автоматично закриває вікно **Solver Monitor** після закінчення обчислень.

3 Натисніть кнопку «Запустить» (Run).

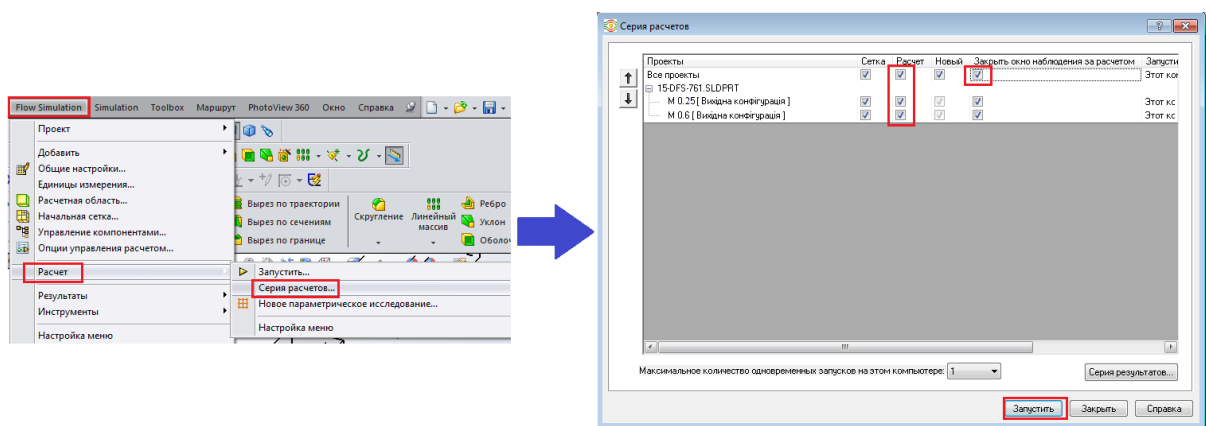


Рисунок 6.19 – Вирішення декількох проектів

17. Отримання результатів розрахунків.

1) Для завантаження результатів розрахунку у дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Загрузить».

2) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

3) В діалоговому вікні «Цели» (Goals) натиснути кнопку «Все» (All).

4) Натиснути **OK** .

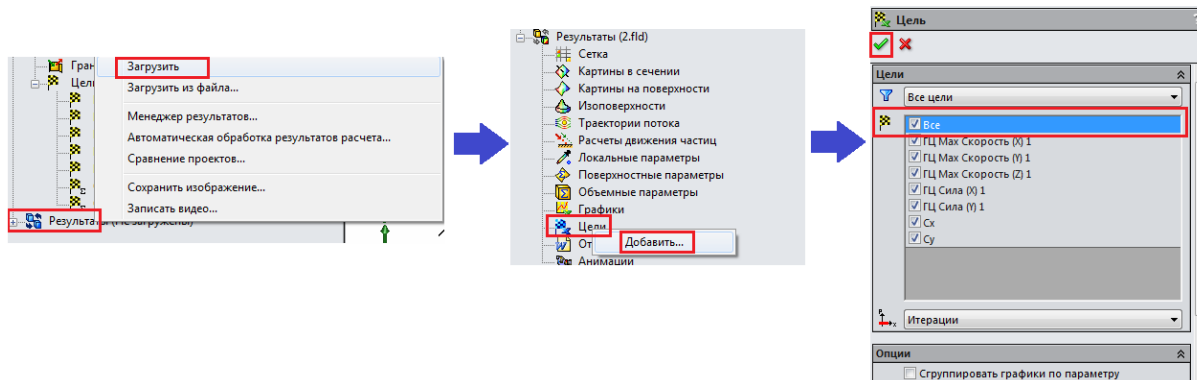


Рисунок 6.20 – Отримання результатів розрахунків

5). У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналізу» натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Экспортировать в эксель» (Export to Excel).

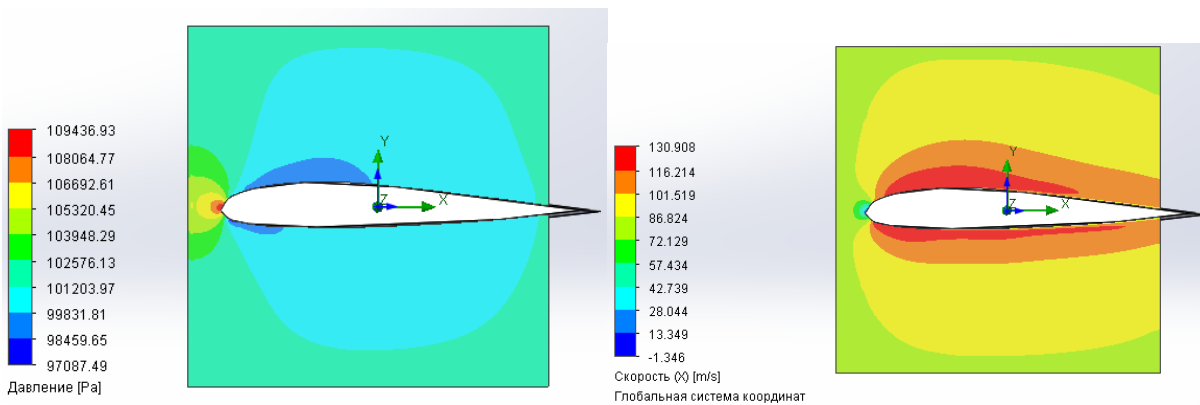
5. В папці з результатами розрахунків з'явиться Excel файл з результатами по цілям.

15-DFS-761.SLDPRT [M 0.25 [Вихідна конфігурація]]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости (%)	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ГЦ Max Скорость (X) 1	[m/s]	131.364982	131.34067	130.58566	131.9052887	100	Да	0.610888395	0.793516214
ГЦ Max Скорость (Y) 1	[m/s]	73.7218215	72.83608199	72.11645031	73.89393721	100	Да	0.531960978	0.716098728
ГЦ Max Скорость (Z) 1	[m/s]	3.1799E-18	6.52869E-18	2.88696E-18	1.08042E-17	100	Да	4.61022E-18	9.62294E-19
ГЦ Сила (X) 1	[N]	1054.12685	1035.219644	1019.832708	1123.156537	100	Да	14.18977605	212.625908
ГЦ Сила (Y) 1	[N]	968.505206	967.8000981	953.2518946	977.2193064	100	Да	2.566853748	101.3159799
Cx	[]	0.0477863	0.046929183	0.046222587	0.05091559	100	Да	0.000643259	0.009638882
Cy	[]	0.04390484	0.043872881	0.043213373	0.044299878	100	Да	0.000116362	0.004592915

Итерации: 160

Интервал анализа: 37



15-DFS-761.SLDPRT [M 0.6 [Вихідна конфігурація]]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости (%)	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ГЦ Max Скорость (X) 1	[m/s]	323.254627	322.4276786	320.9192451	323.3430721	100	Да	2.423626941	2.4268949772
ГЦ Max Скорость (Y) 1	[m/s]	153.247307	153.208952	152.114213	153.6701904	100	Да	1.558769078	1.881710447
ГЦ Max Скорость (Z) 1	[m/s]	8.8713E-18	8.88707E-18	8.87126E-18	8.95032E-18	100	Да	7.90617E-20	6.39454E-19
ГЦ Сила (X) 1	[N]	7018.51591	7031.044155	7012.847482	7057.297637	100	Да	44.06412496	1283.309068
ГЦ Сила (Y) 1	[N]	5700.50517	5675.313774	5643.720709	5700.505167	100	Да	8.821795499	448.4323954
Cx	[]	0.05523741	0.055338009	0.055192796	0.05554263	100	Да	0.000346795	0.010099951
Cy	[]	0.04486435	0.044666084	0.044417439	0.044864347	100	Да	6.94297E-06	0.003529271

Итерации: 211

Интервал анализа: 48

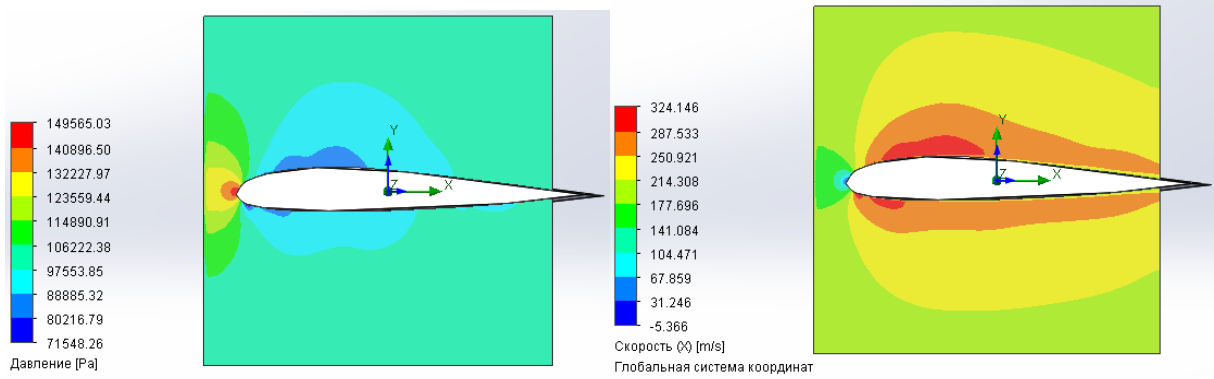


Рисунок 6.21 – Результати розрахунку

6.6. Контрольні запитання

1. Що таке швидкість звуку? Від чого вона залежить?
2. Що таке число Маха?
3. Яким чином розраховуються аеродинамічні коефіцієнти опору та підйомної сили?

Практична робота №7

Розрахунок сполученого теплообміну в SolidWorks Flow Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички розрахунку сполученого теплообміну програмному комплексу SolidWorks. Визначити температуру корпусів критичних електронних компонентів блоку РЕА під навантаженням

Завдання¹ Розглянути поняття сполученого теплообміну, граничних умов, встановлення вентилятора в якості граничних умов, встановлення джерел тепла.

7.1. Короткі теоретичні відомості

Сполучений теплообмін – теплообмін з урахуванням тепловіддачі від твердих тіл.

Підготовка моделі для розрахунку сполученого теплообміну. В середньостатистичній збірці є багато елементів, деталей або підзбірок, непотрібних для аналізу. До створення проекту Flow Simulation потрібно взяти за правило перевіряти модель на наявність компонентів, які можуть бути видалені з дослідження.

Правильна підготовка моделі дозволяє істотно скоротити апаратні ресурси і час розрахунку за рахунок виключення компонентів, що не роблять великий вплив на теплообмінні процеси.

Створення нової системи одиниць виміру. Flow Simulation дає можливість працювати з декількома попередньо встановленими системами одиниць виміру, але досить часто буває зручно створити свою власну систему одиниць виміру. Усі системи одиниць вимірювання зберігаються в інженерній базі даних (**Engineering Database**). Створити бажану систему

¹ Відповіді на зазначені теоретичні питання занести в протокол при підготовці до виконання практичної роботи.

одиниць виміру можна або в **Engineering Database**, або в помічнику (**Wizard**).

Встановлення граничних умов, джерел тепла. Вентилятори (Fans) – один з типів граничних умов. Вентилятори можна встановлювати на поверхнях твердих тіл, вільних від **граничних умов (Boundary Conditions)** і джерел (**Sources**).

В отворах моделі, закритих кришками, можна встановлювати **Припливні (Inlet)** і **Витяжні (Outlet)** вентилятори. Також можна встановлювати **Внутрішні (Internal)** вентилятори на будь-яких гранях всередині області потоку.

При розрахунку моделі з вентилятором, необхідно знати його характеристики. Можна використовувати один з попередньо встановлених вентиляторів з **інженерної бази даних (Engineering Database)**. При відсутності потрібного вентилятора в базі, можна створити свій власний, відповідно до його характеристик.

Граничні умови встановлюватися там, де потік входить в модель або залишає її, за винятком отвору, де встановлений вентилятор. В якості граничних умов можуть встановлюватися **тиск (Pressure)**, **об'ємна витрата (Volume Flow)**, **масова витрата (Mass Flow)** або **швидкість (Velocity)**. Також можна використовувати граничні умови для вказівки умови **ідеальної стіни (Ideal Wall)** – адіабатична, абсолютно гладка стінка, або **реальної стіни (Real Wall)**, що дозволяє встановлювати шорсткість стін і/або температуру і/або коефіцієнт теплообміну на поверхнях моделі. Для внутрішнього аналізу з включеною опцією «**Теплопровідність в твердих телах**» (**Heat conduction in solids**) також можна поставити умову термічної стіни на зовнішній межі моделі, встановленням умови **зовнішньої стіни (Outer Wall)**.

Встановлення джерела тепла. Об'ємні джерела тепла (Volume Source) дозволяють встановлювати інтенсивність теплоутворення (в Ватах) або об'ємну інтенсивність теплоутворення (у Ватах на одиницю об'єму), або

постійну температуру в якості граничної умови для обраного об'єму. Так само можна встановити **поверхневі джерела тепла (Surface Source)**, для яких встановлюється інтенсивність теплоутворення (в Ватах) або тепловий потік (в Ватах на одиницю поверхні).

7.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

7.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у Додатку А.

7.4. Послідовність виконання роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання (Додаток Г) в програмному комплексі SolidWorks визначити температуру корпусів критичних електронних компонентів блоку РЕА під навантаженням.

2. Визначенню підлягає максимальна температура корпусу кожного з процесорів (2 шт.) і всіх мікросхем пам'яті (14 шт.).

3. Розрахунок проводиться при стандартних атмосферних умовах $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 101325 \text{ Па}$.

4. Вентилятор – зовнішній нагнітаючий вісьовий. Модель - Papst 255H.

5. Матеріали компонентів призначаються в відповідності з табл. 7.1. Компонентам, що не зазначені в таблиці, привласнити матеріал Insulator (розділ Glasses & Minerals) Engineering DataBase.

Таблиця 7.1 – Матеріал компонентів блоку РЕА

№	Компонент	Матеріал
---	-----------	----------

1	Процесори	Silicon ²
2	Мікросхеми пам'яті	Silicon
3	Резистори	Silicon
4	Конденсатори керамічні	Silicon
5	Транзистори	Silicon
6	Трансформатори	Copper ³
7	Материнська плата	PCB 4-Layers ⁴
8	Планка пам'яті	PCB 4-Layers
9	Радіатори	Aluminum
10	Конденсатори електролітичні	Aluminum
11	Стінка передня	Steel Stainless 321 ⁵
12	Стінка задня	Steel Stainless 321

6. Параметри тепловіділяючих компонентів блоку РЕА встановлюються індивідуально для кожного студента відповідно до його варіанту.

7. Після проведення розрахунків продемонструвати результати роботи викладачу.

8. Оформити протокол практичної роботи.

7.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:

- роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи;
- опис по етапах порядку визначення температури корпусів критичних електронних компонентів блоку РЕА під навантаженням.

Приклад виконання практичної роботи.

В якості прикладу розглянемо системний блок (рисунок. 7.1), який містить набір електронних компонентів, частина з яких розміщена на друкованих платах (текстоліт), частина – на кожусі корпусу (алюмінієвий сплав).

² Розділ Semiconductors

³ Розділ Metals

⁴ Розділ Non-Isotropic

⁵ Розділ Alloys

Джерелами тепла є всі електронні компоненти – процесор, мікросхеми пам'яті, блок живлення, конденсатори. Вентилятор нагнітає в кожух повітря з температурою 20 °С.

Метою дослідження є створення таких умов охолодження, щоб максимальна температура корпусу процесора і мікросхем пам'яті не перевищувала 50 °С.

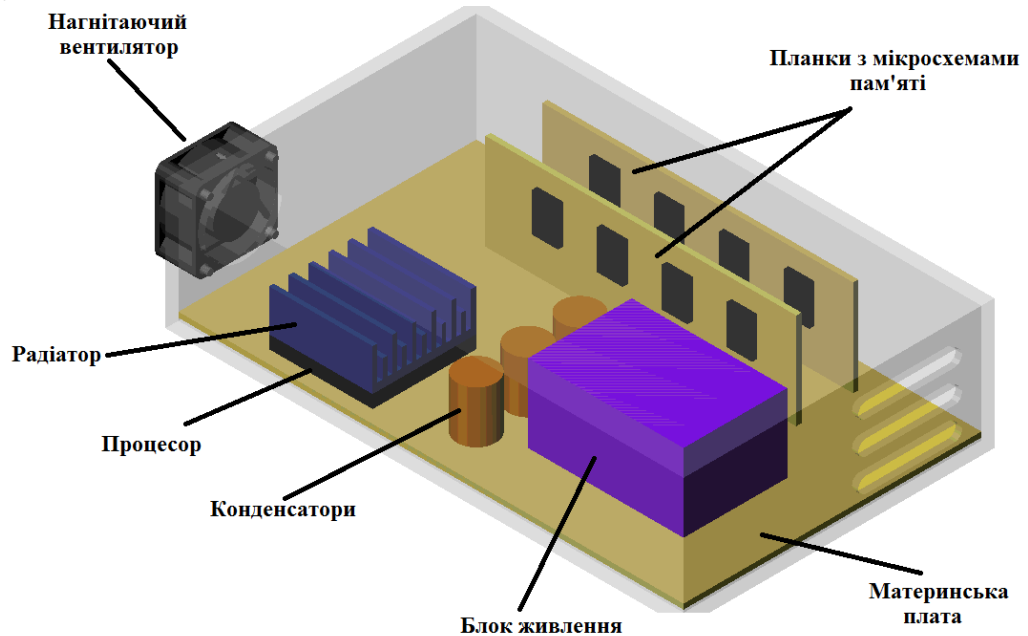


Рисунок 7.1 – Системний блок

Послідовність виконання дослідження:

1. Підготовка моделі. Для підготовки моделі до дослідження необхідно:
 - 1) Запустити програмний комплекс SolidWorks.
 - 2) Через меню «Файл» → «Открыть» відкрити надану викладачем модель.
 - 3) В *Дереві досліджень* виділити вентилятор і всі гвинти (щоб видати більше одного компонента необхідно затиснути клавішу Ctrl під час виділення).
 - 4) Натиснути ПКМ на будь-якому виділеному компоненті та вибрати «Погасить» (Suppress) ↓ .

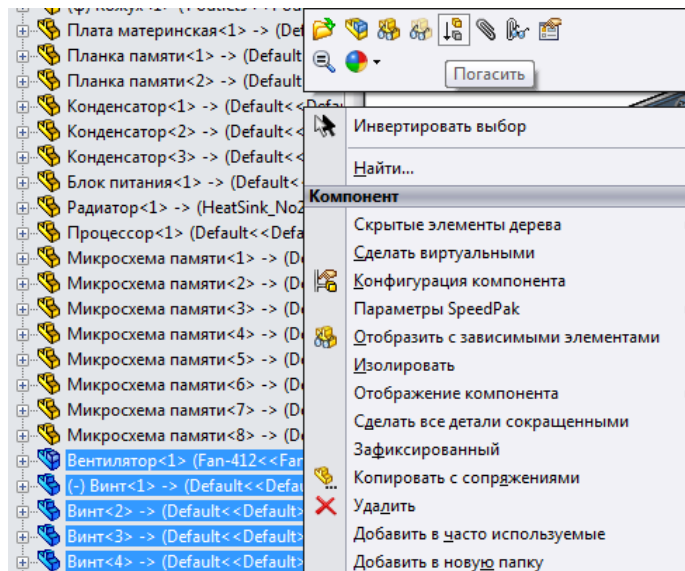


Рисунок 7.2 – «Погашення» компонентів моделі

5) За допомогою спеціального інструменту, що знаходиться в меню **Flow Simulation** → «Інструменти» (Tools) → «Создание заглушек» (**Create Lids**) створити кришки для утворених отворів (вісім отворів від вентилятора та гвинтів).

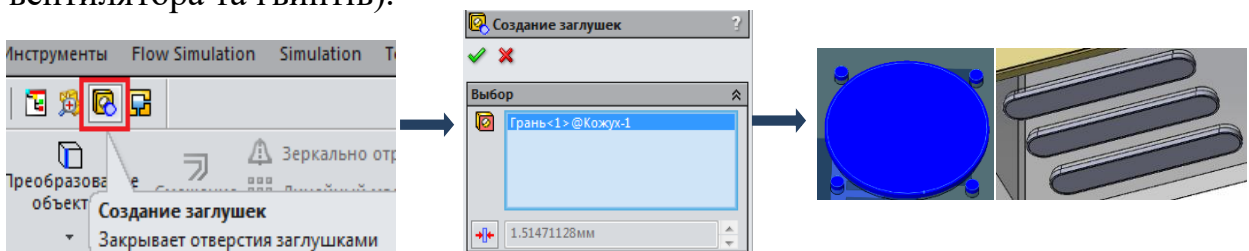


Рисунок 7.3 – Створення «заглушек» для отворів

2. Створення проекту. Для створення проекту необхідно:

1) В меню **Flow Simulation** або в **Менеджері команд** вибрати «Проект» (**Project**) → «Мастер проекта» (**Wizard**)

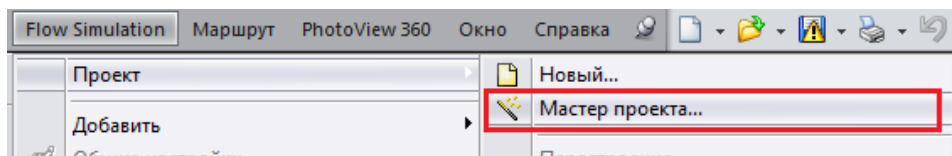


Рисунок 7.4 – Створення нового проекту

2) У вікні «Мастер проекта» (**Wizard**), що з'явиться, необхідно вказати ім'я проекту **Системный блок**, ім'я конфігурації **Вихідна конфігурація** та

вибрати конфігурацію «Создать новую» (Create new) і натиснути кнопку «Далее». Flow Simulation створить нову конфігурацію і збереже всі дані в новій папці.

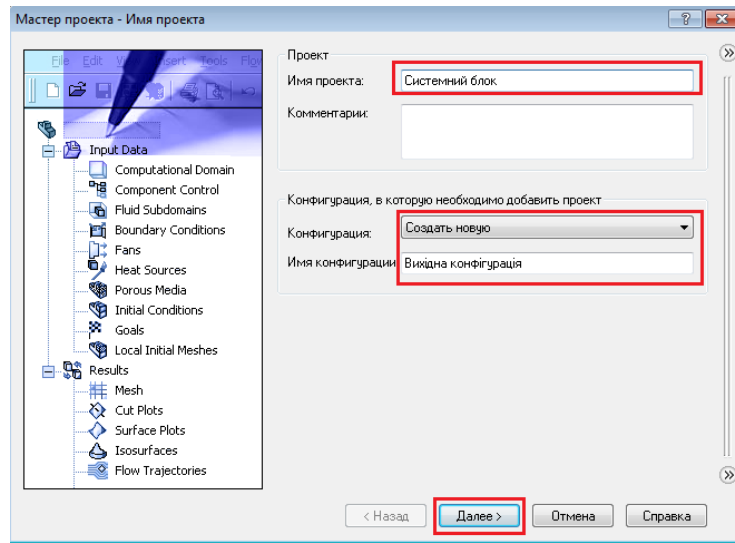


Рисунок 7.5 – Вікно «Мастер проекта» (Wizard)

3. Створення нової системи одиниць виміру. Для створення нової системи одиниць виміру необхідно:

1) У вікні «Система единиц измерения» (Unit System) встановити перемикач «Создать новую» (Create new), виділити існуючу систему одиниць **SI (m·kg·s)** та задати ім'я нової системи **UA electronics**.

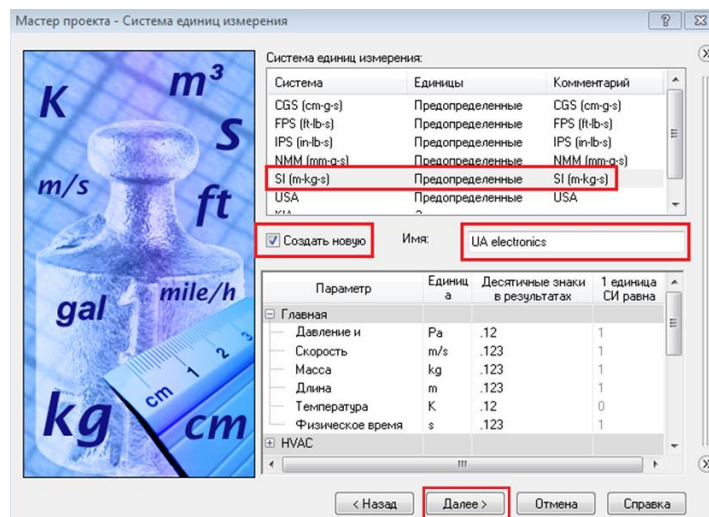


Рисунок 7.6 – Вікно «Система единиц измерения»

2) В розділі «Главная» (Main) для параметру «Температура» (Temperature) необхідно встановити °C. В розділі «Теплота» (Heat) для параметра «Коефициент теплоотдачи» (Heat transfer coefficient) необхідно створити нову одиницю вимірювання $W/m^2/C$ з коефіцієнтом перерахунку 1 до 1.

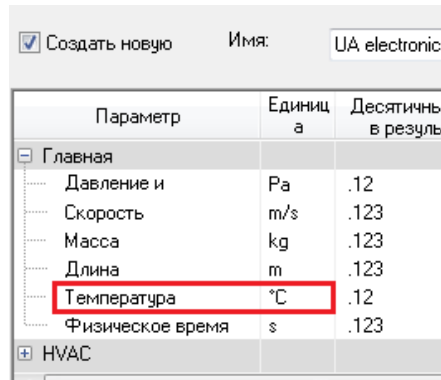


Рисунок 7.7 – Розділ «Главная» (Main) у вікні «Система единиц измерения»

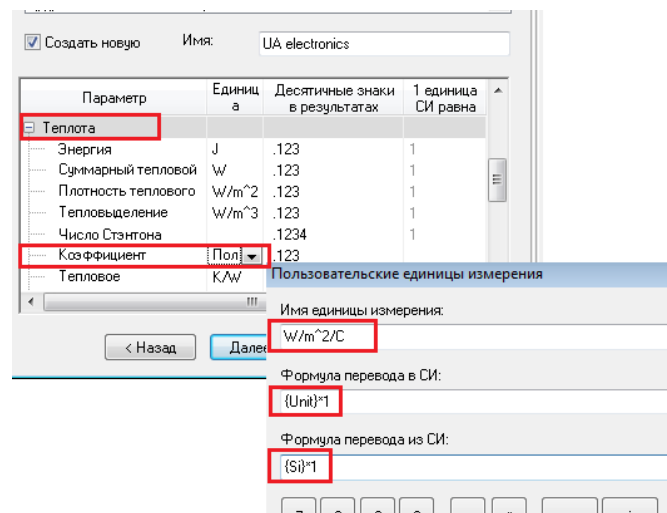


Рисунок 7.8 – Розділ «Теплота» (Heat) у вікні «Система единиц измерения»

4. Вибір типу аналізу.

У вікні «Тип задачі» необхідно включити перемикач «Внутренняя» (Internal) та функція «Теплопроводность в твердых телах» (Heat conduction in solids).

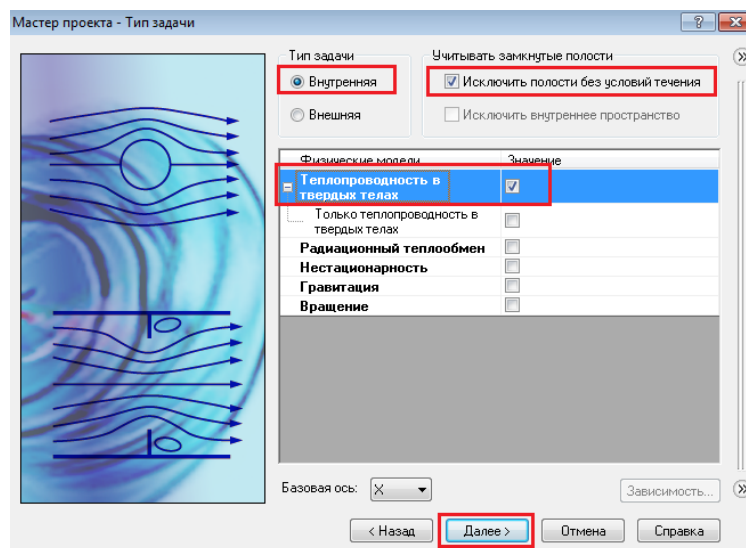


Рисунок 7.9 – Вікно «Тип задачи»

5. Вибір текучого середовища.

У вікні «**Текучая среда**» (**Default Fluid**) необхідно вибрати в якості текучого середовища «**Воздух**» (**Air (Gases)**). Для цього необхідно розкрити розділ «**Газы**» (**Gases**) – «**Предопределенные**» **Pre-Defined** та двічі натиснути **Air**.

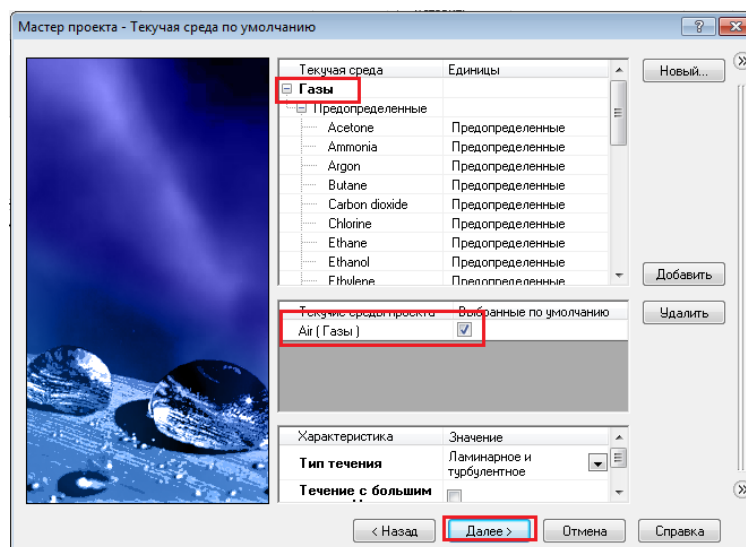


Рисунок 7.10 – Вікно «Текучая среда по умолчанию»

6. Вибір матеріалу твердого тіла.

У вікні «**Материал по умолчанию**» (**Default solid**) встановлюється матеріал всіх твердих тіл моделі. Якщо тіла мають інший матеріал, його

назначають після закінчення роботи **Майстра проектів**. Для нашого прикладу необхідно розкрити розділ **Alloys** та натиснути **Steel Stainless 321**.

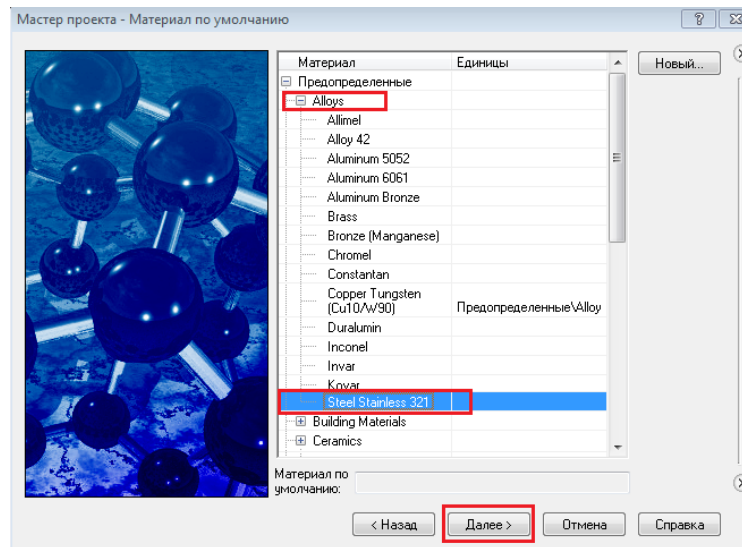


Рисунок 7.11 – Вікно «Матеріал по умовчальному»

7. Встановлення параметри стінок.

У вікні «Умовля на стенках по умовчальному» (**Default wall condition**) у розділі «Теплообмен по умовчальному для зовнішніх стін» (**Default outer wall thermal condition**) необхідно встановити значення «Коефіцієнт теплоотдачи» (**Heat transfer coefficient**) $5.5 \text{ W/m}^2/\text{C}$, а для параметра «Температура зовнішньої текучої середовища» (**Temperature of external fluid**) 20°C .

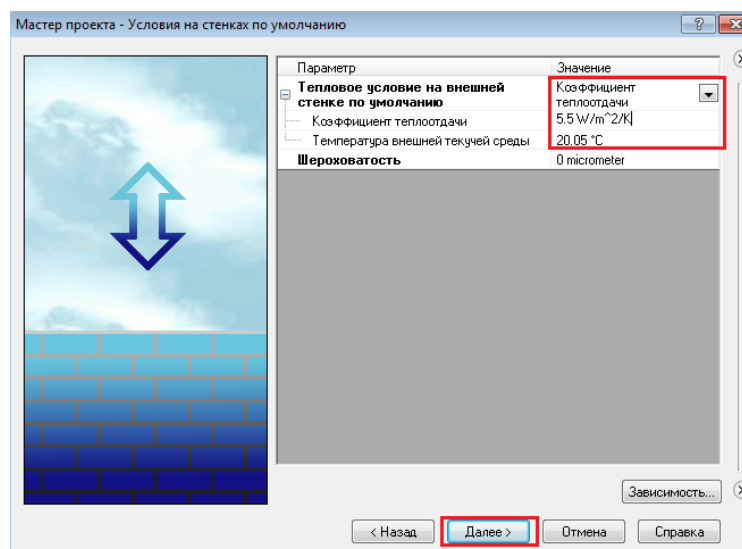


Рисунок 7.12 – Вікно «Умовля на стенках по умовчальному»

8. Встановлення початкових умов.

У вікні «Начальные условия» (**Initial condition**) встановити початкову температуру повітря та нержавіючої сталі (із якої виробляється корпус) рівною 20 °С, оскільки корпус знаходиться у вентилярованому приміщенні.

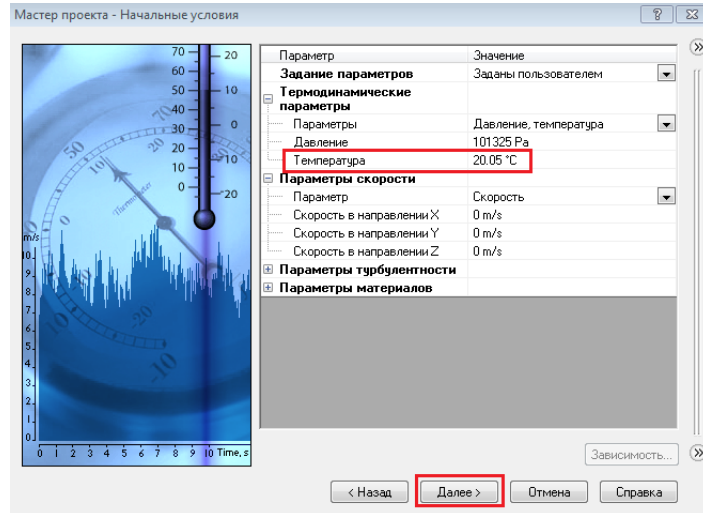


Рисунок 7.13 – Вікно «Начальные условия»

9. Встановлення дозволів та параметри геометрії.

У вікні «Уровень разрешения» (**Result and Geometry Resolution**) усі значення залишити за замочуванням.

Після натискання кнопки «Завершение» Flow Simulation створює нову конфігурацію Початкова конфігурація і поміщає туди модель системного блоку з встановленими параметрами.

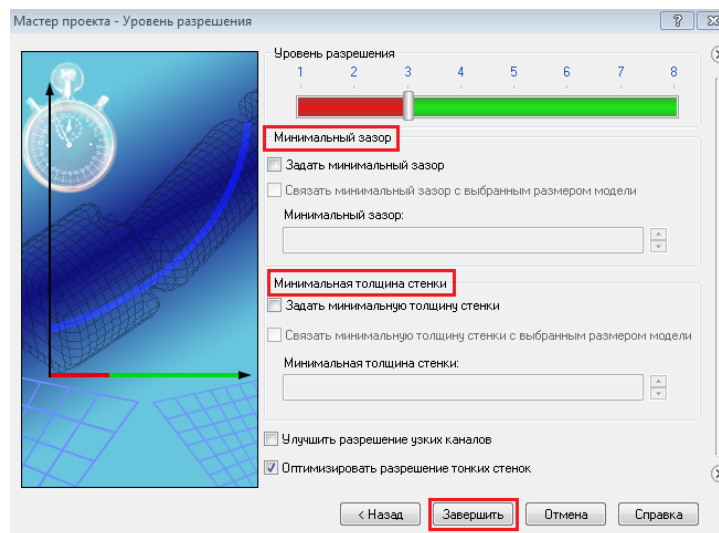


Рисунок 7.14 – Вікно «Уровень разрешения»


10. Встановлення вентилятора. Для того, щоб додати вентилятор необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Добавить» (Insert) → «Вентилятор» (Fan). З'явиться діалогове вікно «Вентилятор» (Fan).

2) Вибрати «Входной внешний вентилятор» (External Inlet Fan) в якості типу вентилятора у вікні «Тип» (Type).

3) Вибрати внутрішню поверхню кришки вентилятора.

4) У списку «Вентилятор» (Fan) вибрати **Papst 412**, який знаходиться в розділі **Pre-Defined-Axial-Papst**.

4. Натиснути **ОК**  . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий розділ – «Вентиляторы» (Fans), і новий елемент – «Входной внешний вентилятор 1» (External Inlet Fan 1).

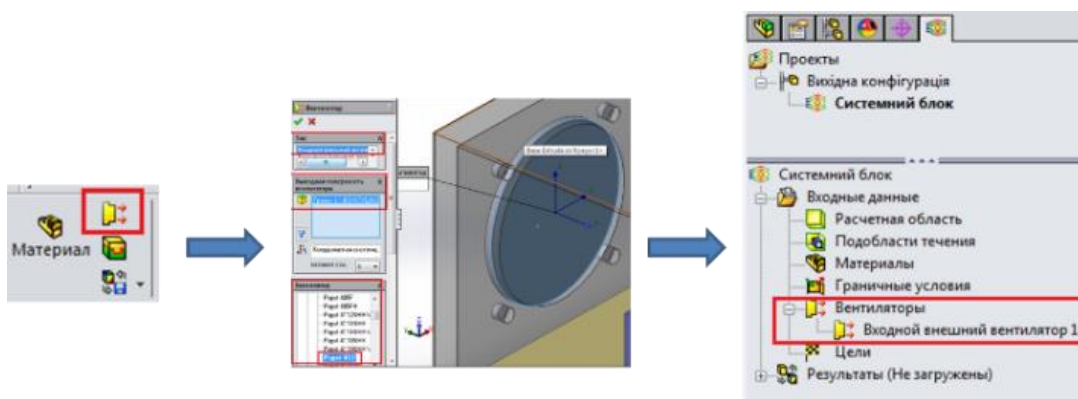



Рисунок 7.15 – Етапи додавання вентилятора

11. Встановлення граничних умов. Для встановлення граничних умов необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (Boundary Conditions) і вибрати «Добавить граничные условия» (Insert Boundary Condition).

2) Вибрати внутрішні межі кришок вихідного отвору.

3) Вибрати в розділі «Тип» (Type) піктограму «Давление» (Pressure) і зі списку вибрати «Давление окружающей среды» (Environment Pressure).

4) Натиснути **ОК**  . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий розділ – «Граничные условия» (Boundary Conditions), і

новый элемент – «Давление окружающей среды 1» (Environment Pressure 1).

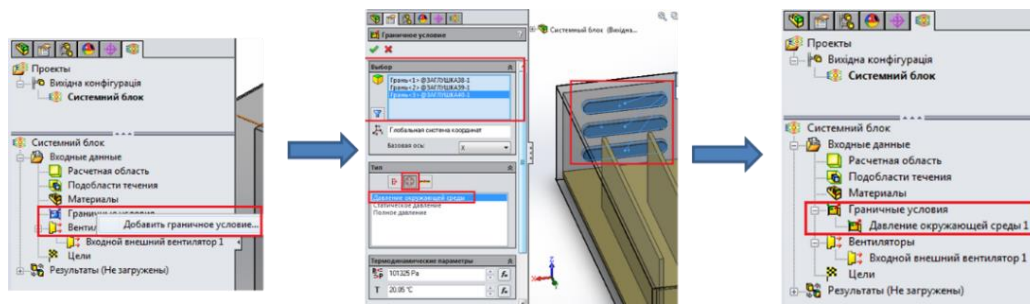


Рисунок 7.16 – Этапы встановлення граничних умов

12. Встановлення джерел тепла. Для встановлення джерел тепла необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Добавить» (Insert) → «Объемный тепловой источник» (Volume Source). З'явиться діалогове вікно «Объемный тепловой источник» (Volume Source).

2) У дереві *Feature Manager design* вибрати деталь «Процессор», як компонент для встановлення об'ємного джерела.

3) У графі «Параметр» (Parameter) вибрати «Мощность тепловыделения» (Heat Generation Rate) та у строчці «Мощность тепловыделения» (Heat Generation Rate) ввести 5W.

4) Натиснути **OK** .

5) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» два рази натиснути ЛКМ на новому елементі «VS Мощность тепловыделения 1» та перейменувати його на «Процессор».

6) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконки «Тепловые источник» (Heat Sources) та вибрати «Добавить объемный источник» (Insert Volume Source).

7) У дереві *FeatureManager design* вибрати усі конденсатори «Конденсатор».

8) У графі «Параметр» (Parameter) вибрати «Температура» (Temperature) та у строчці «Температура» (Temperature) ввести 38 °C.

9) Натиснути **ОК**  .

10) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «**VS Температура 1**» і перейменувати його в «**Конденсаторы**».

11) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконки «**Тепловые источники**» (**Heat Sources**) та вибрати «**Добавить объемный источник**» (**Insert Volume Source**).

12) У дереві *FeatureManager design* вибрати усі чіпи на платах «**Микросхема памяти**».

13) У графі «**Параметр**» (**Parameter**) вибрати «**Мощность тепловыделения**» (**Heat Generation Rate**) та у строчці «**Мощность тепловыделения**» (**Heat Generation Rate**) ввести **4 W**.

14) Натиснути **ОК**  .

15) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «**VS Мощность тепловыделения 1**» та перейменувати його на «**Память**».

16) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконки «**Тепловые источники**» (**Heat Sources**) та вибрати «**Добавить объемный источник**» (**Insert Volume Source**).

17) У дереві *FeatureManager design* вибрати блок живлення «**Блок питания**».

18) У графі «**Параметр**» (**Parameter**) вибрати «**Температура**» (**Temperature**) та у строчці «**Температура**» (**Temperature**) ввести **49 °C**.

19) Натиснути **ОК**  .

20) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «**VS Температура 1**» і перейменувати його в «**Блок питания**».

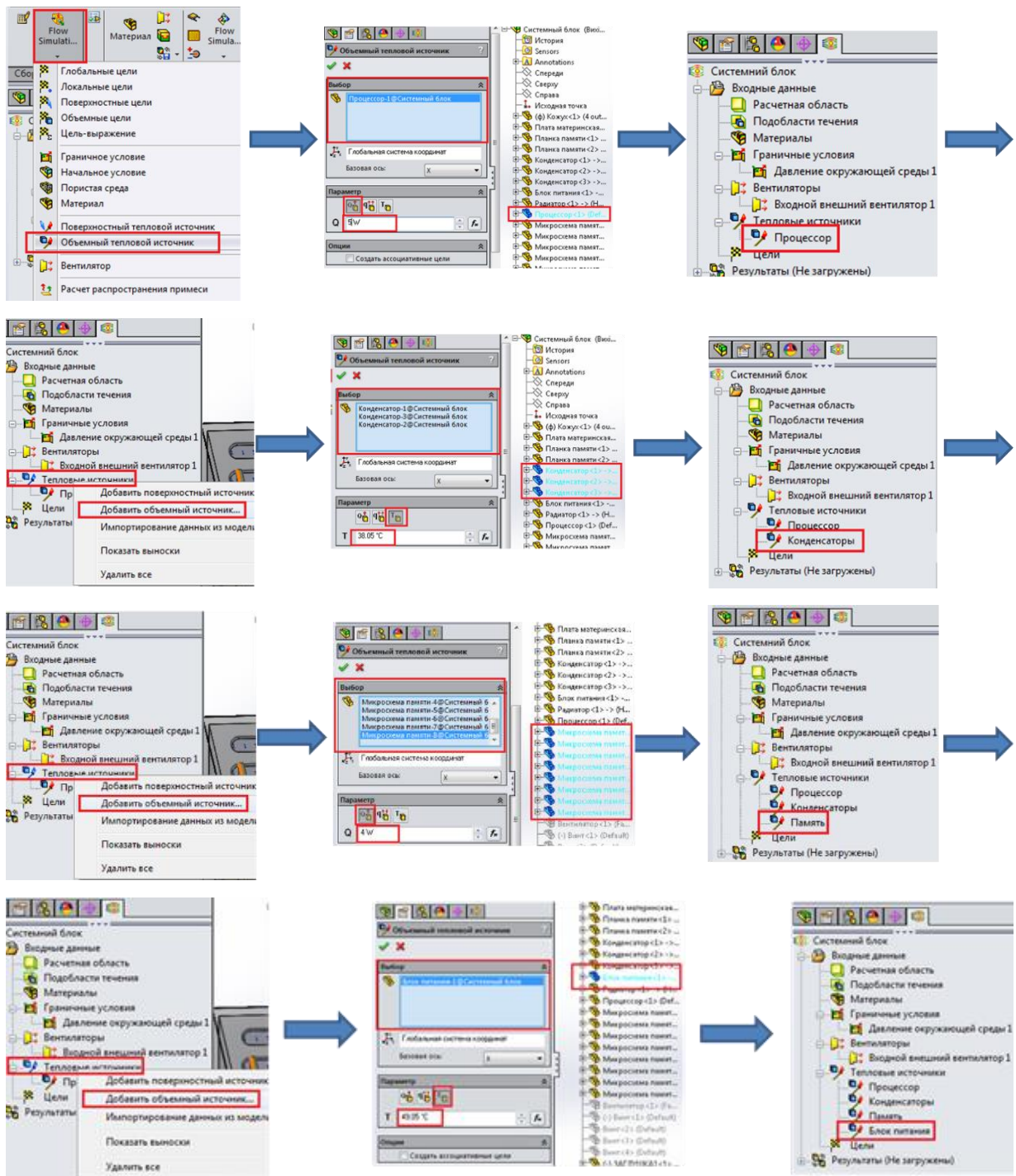


Рисунок 7.17 – Этапы встановлення джерел тепла

13. Створення нового матеріалу. Для встановлення нового матеріалу необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Инструменты» (Tools) → «Инженерная база данных» (Engineering Database).

2) У дереві бази знань вибрати «Вещества» (Materials) → «Материал» (Solids) → «Заданы пользователем» (User Defined). Натиснути ПКМ та вибрати «Новый элемент».

3) У вікні властивостей матеріалу ввести наступні дані:

«Имя» (Name) – «Печатная плата»

«Комментарий» (Comments) – «Изотропный материал»

«Плотность» (Density) – 1120 kg/m^3

«Удельная теплоемкость» (Specific heat) – $1400 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

«Тип проводимости» (Conductivity type) – «Изотропная»

«Коэффициент теплопроводности» (Thermal conductivity) – $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

«Температура плавления» (Melting temperature) – 390 K

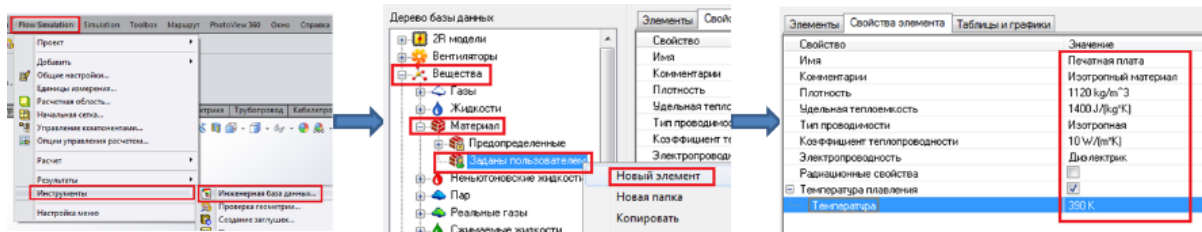


Рисунок 7.18 – Этапы створення нового матеріалу для «Печатной платы»

4) Аналогічно необхідно створити матеріал і для «Микросхема памяти». У вікні властивостей матеріалу ввести наступні дані:

«Имя» (Name) – «Микросхема памяти»

«Комментарий» (Comments) – «Корпус электронного компонента»

«Плотность» (Density) - 2000 kg/m^3

«Удельная теплоемкость» (Specific heat) - $120 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

«Тип проводимости» (Conductivity type) – «Изотропная»

«Коэффициент теплопроводности» (Thermal conductivity) – $0.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

«Температура плавления» (Melting temperature) – 1688.2 K

Перед виходом з бази даних її необхідно зберегти.

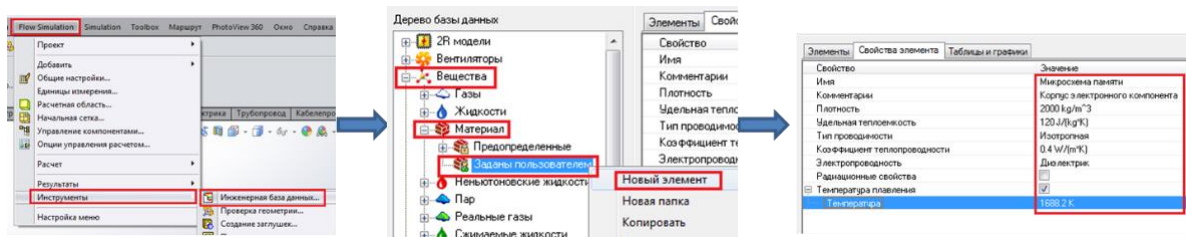


Рисунок 7.19 – Этапы створення нового матеріалу для «Микросхеми ПАМ'ЯТИ»

14. Присвоєння матеріалів. Для того, щоб задати матеріали для деталей збірки необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Матеріали» (**Solid Materials**) і вибрати «Добавить материал» (**Insert Solid Material**).

2) У дереві *Feature Manager design* виділити «Плата материнская», «Планка памяти <1>» і «Планка памяти <2>».

3) В графі «Матеріали» (**Solid**) розкрити пункт «Заданы пользователем» (**User Defined**) і вибрати «Печатная плата».

4) Натиснути **ОК** .

5) Діючи за тим же алгоритмом, необхідно вказати тверді матеріали для інших компонентів:

– для «Процессор» і «Планка памяти» (8 шт.) призначити створений матеріал «Микросхема памяти» (знаходиться в розділі «Заданы пользователем» (**User Defined**));

– «Радиатор» зроблений з алюмінію (**Aluminum**) (знаходиться в розділі «Предопределенные» (**Pre-Defined**)-**Metals**);

– кришки («Заглушка» (8 шт.)) зроблені з ізолятора (**Insulator**) (знаходиться в розділі «Предопределенные» (**Pre-Defined**)-**Glasses and Minerals**).

6) Натиснути «Файл» (**File**) → «Сохранить» (**Save**).

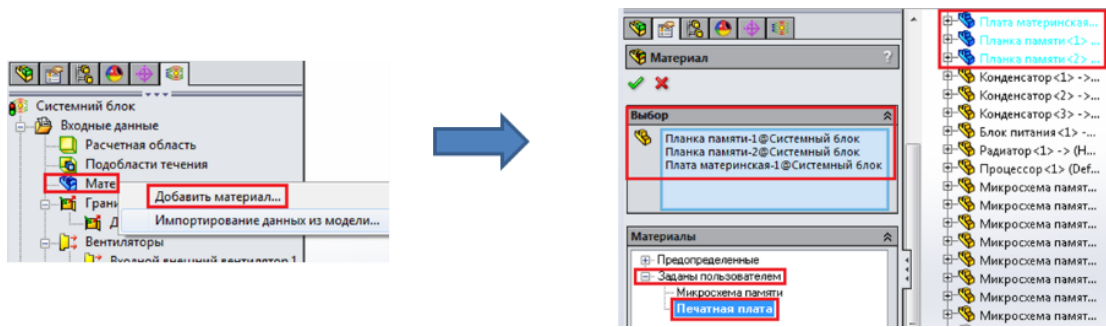


Рисунок 7.20 – Этапы присвоивання матеріалів компонентам збірки

15. Встановлення об'ємних цілей. Для того, щоб вказати об'ємні цілі необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить объемные цели» (Insert Volume Goals).

2) У дереві *Feature Manager design* вибрати всі маленькі чіпи (8 шт.) «Микросхема памяти».

3) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець **Max** для рядка «Температура (твердое тело)» (Temperature of Solid).

4) Залишити активованою опцію «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використовувати цю ціль для контролю конвергенції.

5) Натиснути **ОК** .

6) У дереві *Flow Simulation Analysis* «Дерево анализа» натиснути два рази ЛКМ на новому елементі «ОЦ Max Температура (твердое тело) 1» і перейменувати його в «Микросхема памяти Max Температура».

Аналогічно необхідно повторити цю процедуру для «Процессор».

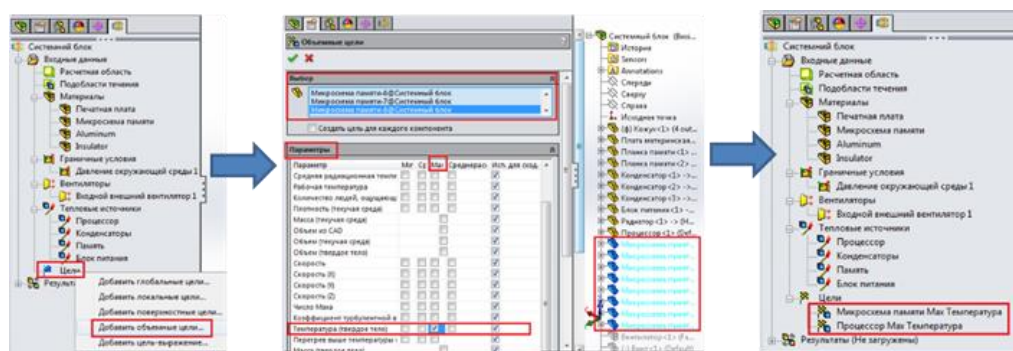


Рисунок 7.21 – Этапы встановлення об'ємних цілей


16. Встановлення поверхневих цілей. Для того, щоб вказати поверхневі цілі необхідно:


1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить поверхностные цели» (Insert Surface Goals).

2) Клацнути по вкладці Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» і вибрати елемент «Входной внешний вентилятор 1», щоб виділити грань додавання цілі.

3) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець «Ср» (Av) для рядка «Статическое давление» (Static Pressure).

4) Залишити активованою опцію «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використовувати цю ціль для контролю конвергенції.

5) У графі «Имя шаблона» (Name Template), розташованої внизу PropertyManager, натиснути кнопку «Вход» (Inlet)  і потім видалити поле «<Номер>» (<Number>) в рядку «Имя шаблона» (Name Template).


6) Натиснути ОК . З'явиться нова ціль «ПЦ ВходСр Статическое давление».


7) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить поверхностные цели» (Insert Surface Goals).

8) Клацнути по вкладці Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» і вибрати елемент «Входной внешний вентилятор 1», щоб виділити грань додавання цілі.

9) В таблиці «Параметры» (Parameter) встановити прапорець в рядку «Массовый расход» (Mass Flow Rate).

10) Залишити активованою опцію «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використовувати цю ціль для контролю конвергенції.

11) У графі «Имя шаблона» (Name Template), розташованої внизу PropertyManager, натиснути кнопку «Выход» (Outlet)  і потім видалити поле «<Номер>» (<Number>) в рядку «Имя шаблона» (Name Template).

12) Натиснути **ОК** . З'явиться нова ціль «ПЦ Выход Массовый расход».

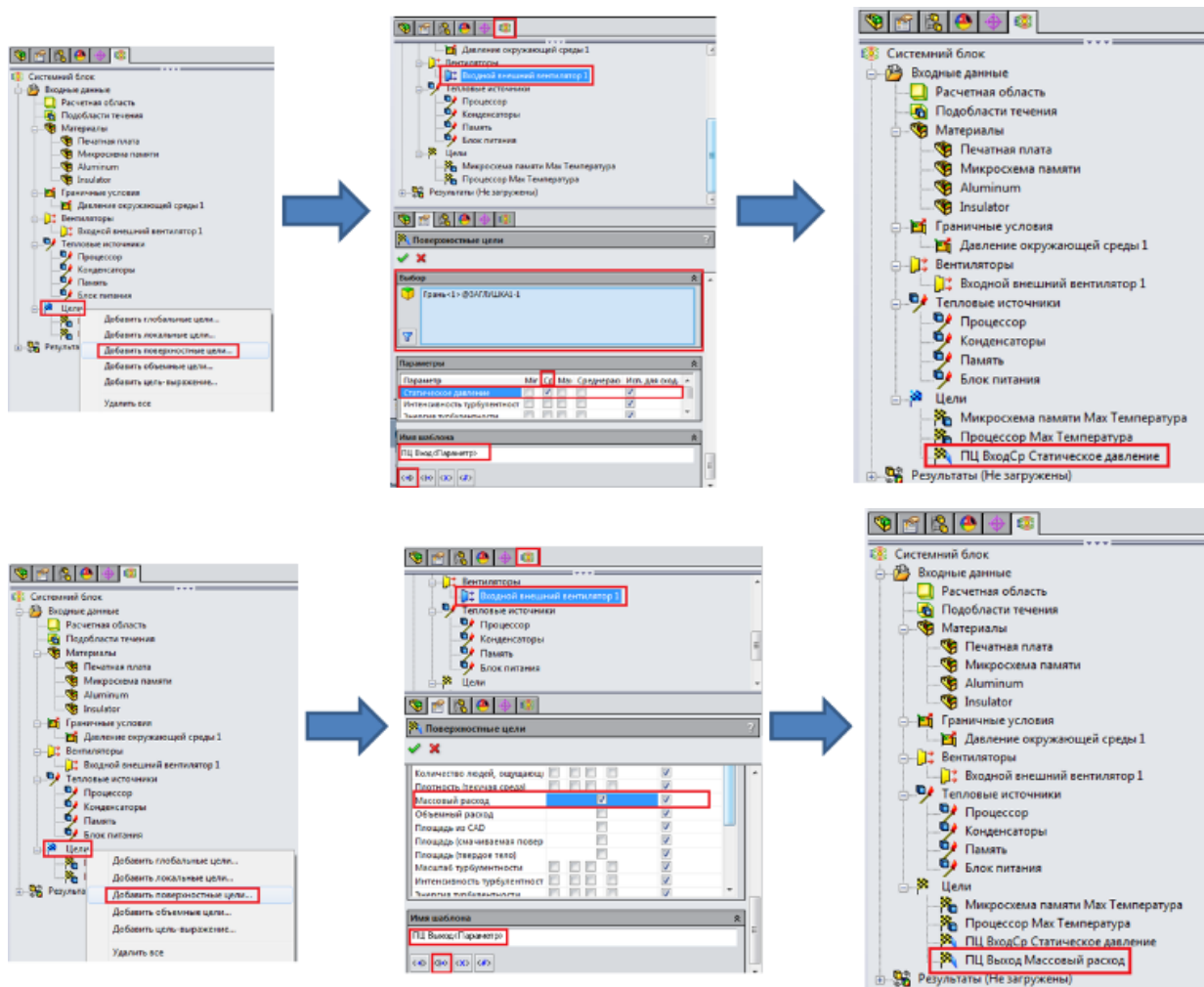


Рисунок 7.22 – Етапи встановлення поверхневих цілей


17. Встановлення глобальних цілей. Для того, щоб вказати глобальні цілі необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить глобальные цели» (Insert Global Goals).

2) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець «Sp» (Av) для рядка «Статическое давление» (Static Pressure) і рядка «Температура (текущая среда)» (Temperature of Fluid).

3) Залишити активованою опцією «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використовувати цю ціль для контролю конвергенції.

4) У графі «Имя шаблона» (Name Template), розташованої внизу PropertyManager, видалити поле «<Номер>» (<Number>) в рядку «Имя шаблона» (Name Template).

5. Натиснути **ОК** . З'явиться дві цілі «ГЦ Ср Статическое давление» та «ГЦ Ср Температура (текучая среда)».

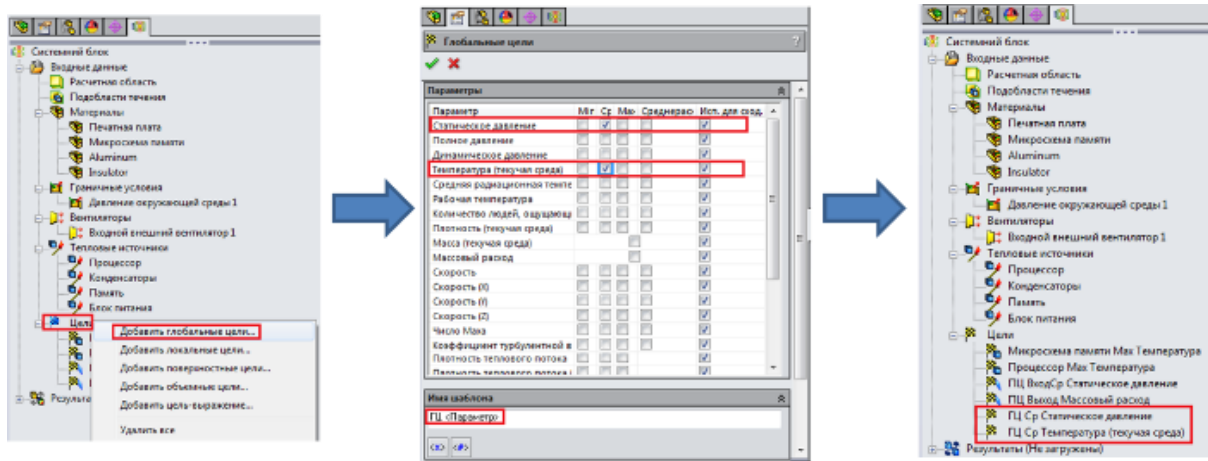



Рисунок 7.23 – Етапи встановлення глобальних цілей

18. Зміна дозволу геометрії. Для зміни дозволу геометрії необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Начальная сетка» (Initial Mesh).
- 2) Увімкнути опцію «Задать минимальный зазор» (Manual specification of the minimum gap size).
- 3) В рядку «Минимальный зазор» (Minimum gap size) ввести **0.0025 m** (відстань між ребрами радіатора).
- 4) Натиснути **ОК** .

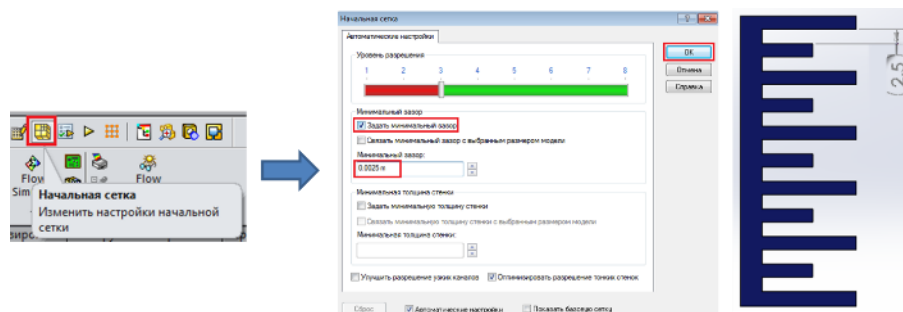


Рисунок 7.24 – Етапи зміни дозволу геометрії

19. Запуск моделі на розрахунок. Для запуску розрахунку необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Расчет» (Solve) → «Запустить» (Run).
- 2) Натиснути кнопку «Запустить» (Run).
- 3) Для завантаження результатів розрахунку у дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Выгрузить».

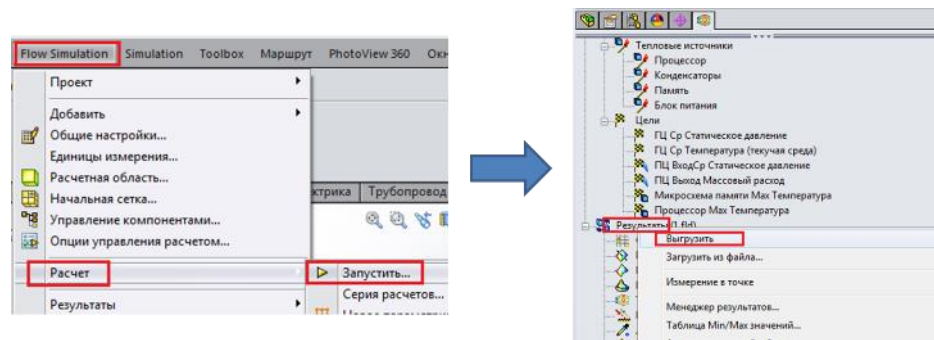

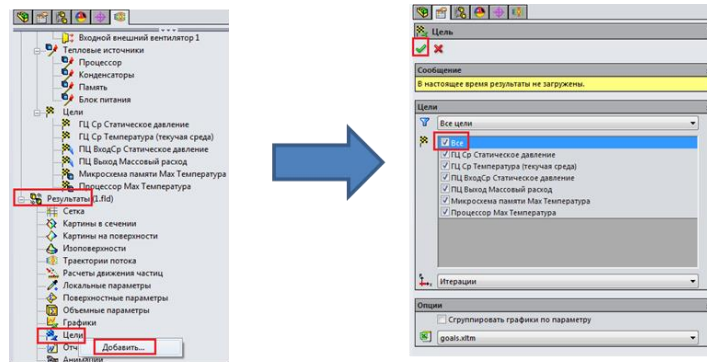


Рисунок 7.25 – Запуск моделі на розрахунок

20. Перегляд цілей розрахунку. Для перегляду цілей розрахунку необхідно:

- 1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).
- 2) В діалоговому вікні «Цели» (Goals) натиснути кнопку «Все» (All).
3. Натиснути ОК .
4. У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Экспортировать в эксель» (Export to Excel).
5. В папці з результатами розрахунків з'явиться Excel файл з результатами по цілям.



Системный блок.SLDASM [Системный блок [Вихідна конфігурація]]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ПЦ Ср Статическое давл	[Pa]	101330,619	101330,6264	101330,6173	101330,66	100	Да	0,042746389	0,046802335
ПЦ Ср Температура (теучая среда)	[°C]	27,0304582	27,03194819	26,91989439	27,05501316	100	Да	0,135318768	0,208697545
ПЦ Выход Ср Статическое	[Pa]	101330,106	101330,0977	101330,0853	101330,1055	100	Да	0,020151952	0,268413188
ПЦ Выход Массовый расход	[kg/s]	0,0030763	0,003076948	0,003076011	0,003077269	100	Да	2,25107E-06	5,20303E-05
Микроосев памяти Max	[°C]	45,9518074	46,07515097	45,85488093	46,23285651	100	Да	0,58789882	0,617438025
Процессор Max Температ	[°C]	40,8550735	40,8481988	40,82193988	40,88570103	100	Да	0,083787352	0,476087818

Итерации: 121

Интервал анализа: 56

Рисунок 7.26 – Результаты розрахунку по цілям


21. Результаты розрахунку у вигляді траекторій потоку. Для того, щоб відобразити траекторії потоку необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Траектории потока» (Flow Trajectories) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

2) Перейти на вкладку Flow Simulation Analysis «Дерево анализа», потім клацнути по елементу «Входной внешний вентилятор 1», щоб виділити внутрішню грань вхідної кришки «Заглушка1».

3) Встановити кількість траекторій в рядку «Количество точек» (Number of Trajectories) рівне 200.

4) У графі «Представление» (Appearance) в рядку «Показать траектории как» (Draw Trajectories As) вибрати «Полоски» (Bands) та в рядку «Раскрасить по параметру» (Color by parameter) вибрати «Скорость» (Velocity).

5) Натиснути ОК . У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» з'явиться новий елемент «Траектории потока 1» (Flow Trajectories 1).

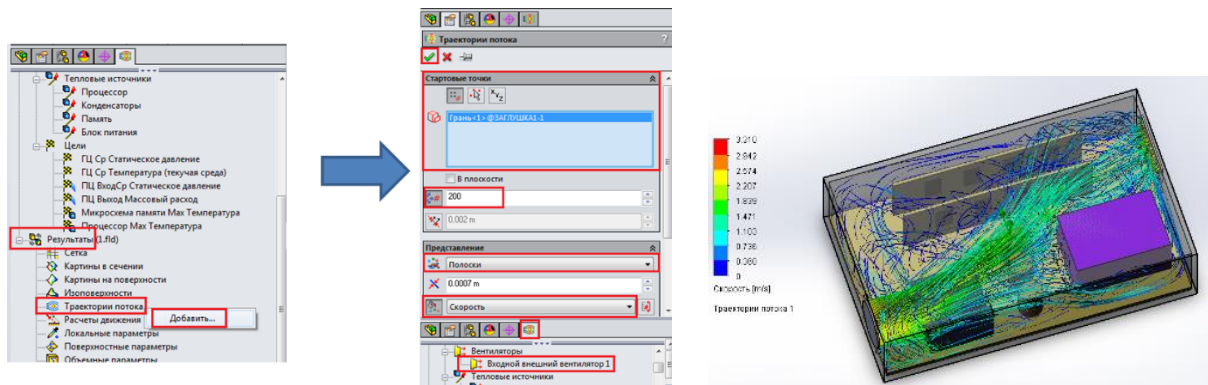


Рисунок 7.27 – Результаты розрахунку по траекториям потока

22. Результаты розрахунку у вигляді січних площин. Для зручності аналізу зображень січних площин необхідно приховати траєкторії потоку.

Для того, щоб приховати траєкторії потоку необхідно натиснути ПКМ на іконці «Траектории потока 1» (Flow Trajectories 1) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Скрыть» (Hide).

На панелі інструментів «Ориентация видов» (Standard Views) вибрати вид «Сверху» (Top).

Для того, щоб змінити відображення швидкості потоку на відображення температури, необхідно перейти в режим редагування створеної епюри «Траектории потока 1» (Flow Trajectories 1), в Менеджері властивостей «Картины в сечении» (Cut Plots) змінити відображення на «Температура» (Temperature).

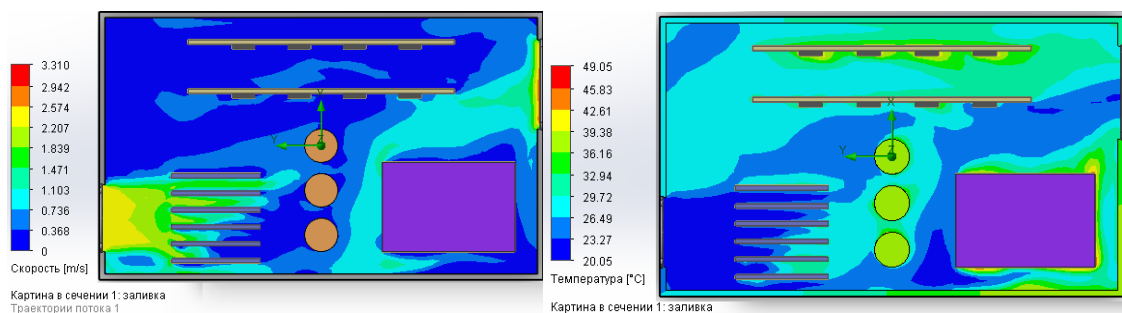


Рисунок 7.28 – Результаты розрахунку у вигляді січних площин

23. Результаты розрахунку у вигляді епюри поверхні. Для того, щоб відобразити епюри поверхні необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Картины на поверхности» (Surface Plots) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

2) У дереві **Feature Manager design** вибрати компоненти «Процесор», «Радиатор», «Блок питания» та всі «Конденсатор» і «Микросхема пам'яті».

3) У графі «Заливка» вибрати «Температура (тверде тело)» (**Solid Temperature**)

4) Натиснути **ОК**. У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент «Картина на поверхності 1» (**Surface Plot 1**).

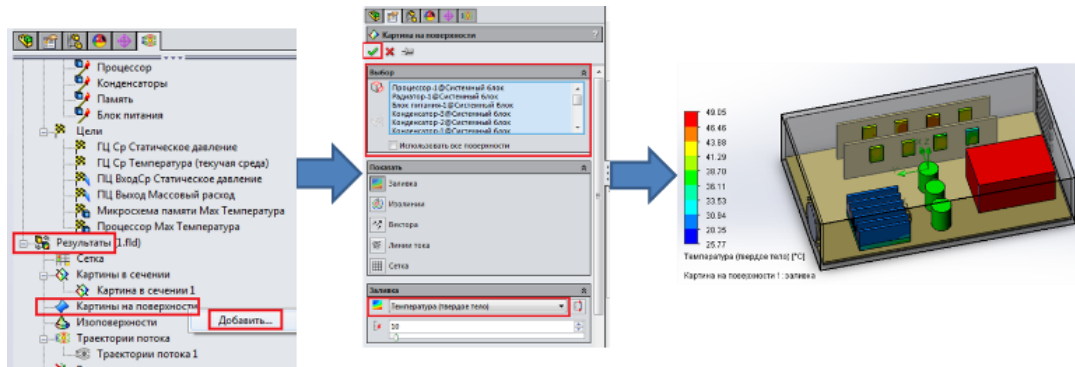


Рисунок 7.29 – Результати розрахунку у вигляді епюри поверхні

24. Формування звіту дослідження. Для формування звіту необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Расчет» (**Solve**) → «Отчет» (**Report**).

2) Натиснути кнопку «По шаблону» (**From Template**) і вибрати файл шаблону.

Сформований звіт зберегти в папці проекту.

7.6. Контрольні запитання

1. Що таке сполучений теплообмін?
2. Яким чином створюється нова система одиниць вимірювання?
3. Що може встановлюватися в якості граничних умов?

Практична робота №8

Розрахунок ефективності теплообмінника в SolidWorks Flow Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички розрахунку ефективності теплообмінника програмному комплексу SolidWorks. Визначити ККД теплообмінного апарату

Завдання¹. Розглянути поняття теплообміну: фактична та максимальна теплопередача, ККД теплообмінника.

8.1. Короткі теоретичні відомості

Критерієм оцінки ефективності є ККД. Стосовно до теплообмінника ККД визначається, як відношення фактичної до максимально можливої теплопередачі.

$$\varepsilon = \frac{\text{Фактична теплопередача}}{\text{Максимальна теплопередача}}$$

Фактична теплопередача обчислюється, як втрата енергії гарячого текучого середовища, або як енергія, отримана холодним текучим середовищем.

Максимальна теплопередача відповідає різниці між температурою холодного та гарячого текучого середовища на вході в теплообмінник за умови, що це текуче середовище піддалося температурним змінам, що дорівнюють максимальній різниці температур в теплообміннику.

$\varepsilon = \frac{T_{\text{вх}}^{\text{гаряч}} - T_{\text{вих}}^{\text{гаряч}}}{T_{\text{вх}}^{\text{гаряч}} - T_{\text{вх}}^{\text{хол}}}$ - якщо коефіцієнт потужності гарячого текучого середовища менше коефіцієнта потужності холодного

$\varepsilon = \frac{T_{\text{вих}}^{\text{хол}} - T_{\text{вх}}^{\text{хол}}}{T_{\text{вх}}^{\text{гаряч}} - T_{\text{вх}}^{\text{хол}}}$ - якщо коефіцієнт потужності гарячого текучого середовища більше коефіцієнта потужності холодного.

¹ Відповіді на зазначені теоретичні питання занести в протокол при підготовці до виконання практичної роботи.

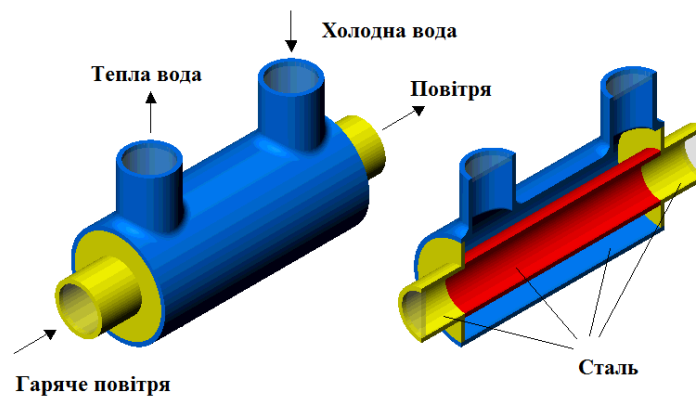


Рисунок 8.1 – Схема руху потоків в теплообмінному апараті

8.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

8.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у додатку А.

8.4. Послідовність виконання роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання (Додаток Д) в програмному комплексі SolidWorks виконати розрахунок ККД теплообмінного апарату, представленого на рисунок 8.1.

2. ККД теплообмінного апарату ε визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{T_{пов.гаряч}^{вх\text{ід}} - T_{пов.холодн}^{вх\text{ід}}}{T_{пов.гаряч}^{вх\text{ід}} - T_{водахолодн}^{вх\text{ід}}}$$

3. Розрахунок проводиться при стандартних атмосферних умовах $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 101325 \text{ Па}$. Матеріал усіх елементів теплообмінника – Мідь (Copper), коефіцієнт теплопередачі $5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, тиск води в кожусі теплообмінника 2 атм .

4. Після проведення розрахунків продемонструвати результати роботи викладачу.

5. Оформити протокол практичної роботи.

8.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:

- роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи;
- опис по етапах порядку визначення ККД теплообмінного апарату.

Приклад виконання практичної роботи.

Вихідні данні: Необхідно виконати розрахунок ККД теплообмінного апарату (рисунок. 8.1).

Матеріал теплообмінного апарату – нержавіюча сталь.

Коефіцієнт теплопередачі – 5 Вт/м²К.

Тиск води в кожусі теплообмінника – 2 атм.

Тиск повітря в кожусі теплообмінника – 1 атм.

Температура холодної води – 20 °С, **гарячого повітря** – 326,9 °С.

Витрата холодної води – 0,001 кг/с, **швидкість гарячого повітря** – 10 м/с.

Послідовність виконання дослідження:

1. Підготовка моделі. Для підготовки моделі до дослідження необхідно:

- 1) Запустити програмний комплекс SolidWorks.
- 2) Через меню «Файл» → «Открыть» відкрити надану викладачем модель.

2. Створення проєкту. Для створення нового проєкту необхідно:

- 1) В меню **Flow Simulation** або в **Менеджері команд** вибрати «Проект» (Project) → «Мастер проекта» (Wizard)

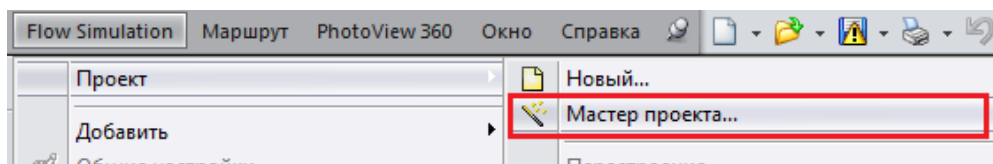


Рисунок 8.2 – Створення нового проекту

2) У вікні «Мастер проекта» (Wizard), що з'явиться, необхідно вказати ім'я проекту **Каталізатор**, ім'я конфігурації **Ізотропний** та вибрати конфігурацію «Создать новую» (Create new) і натиснути кнопку «Далее».

Flow Simulation створить нову конфігурацію і збереже всі дані в новій папці.

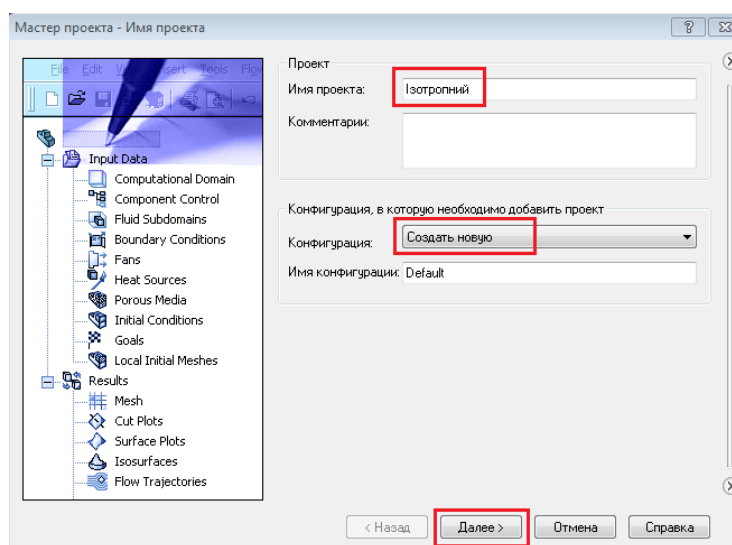


Рисунок 8.3 – Вікно «Мастер проекта» (Wizard)

3. Створення нової системи одиниць виміру. Для створення нової системи одиниць виміру необхідно:

1) У вікні «Система единиц измерения» (Unit System) виділити існуючу систему одиниць **Si (m-kg-s)** та змінити одиниці виміру температури на $^{\circ}\text{C}$.

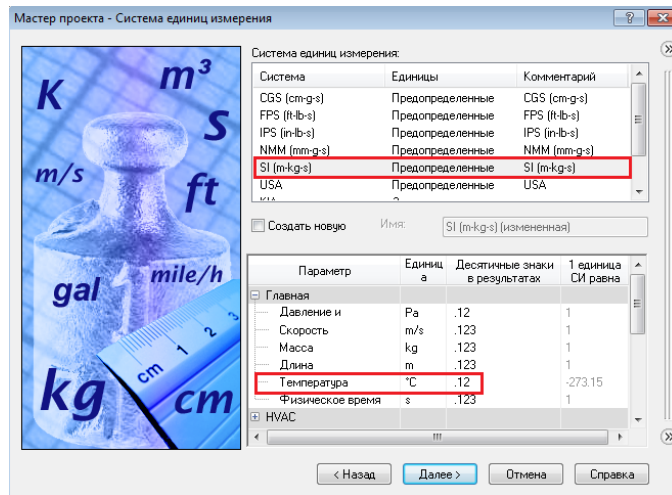


Рисунок 8.4 – Вікно «Система единиц измерения»

4. Вибір типу аналізу.

У вікні «Тип задачі» необхідно включити перемикач «Внутренняя» (Internal) та функція «Теплопроводность в твердых телах» (Heat conduction in solids).

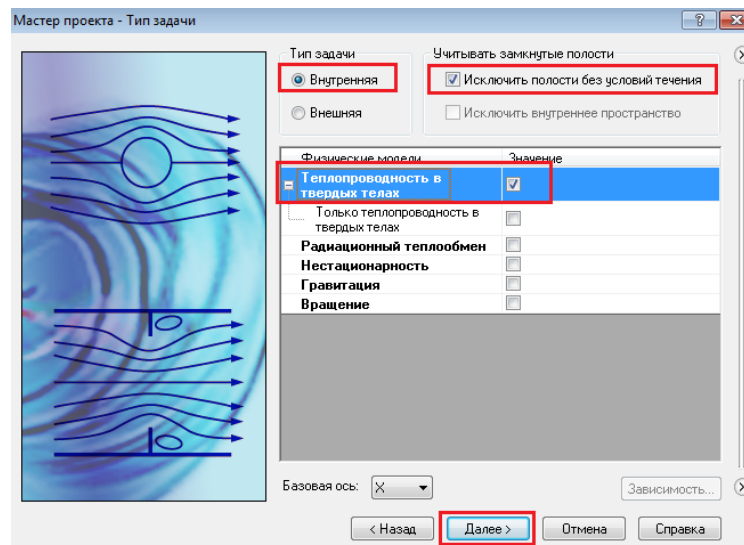


Рисунок 8.5 – Вікно «Тип задачі»

5. Вибір текучого середовища.

У вікні «Текучая среда» (Default Fluid) необхідно вибрати в якості текучого середовища «Вода» (Water) та «Воздух» (Air (Gases)). Для встановлення двох рідких середовищ необхідно розкрити розділ «Жидкости» (Liquids) – «Предопределенные» Pre-Defined та двічі

натиснути «Вода» (Water), потім розкрити розділ «Газы» (Gases) – «Предопределенные» Pre-Defined та двічі натиснути «Воздух» (Air). В якості текучого середовища за замовчуванням (Default fluid type) обрати «Вода» (Water).

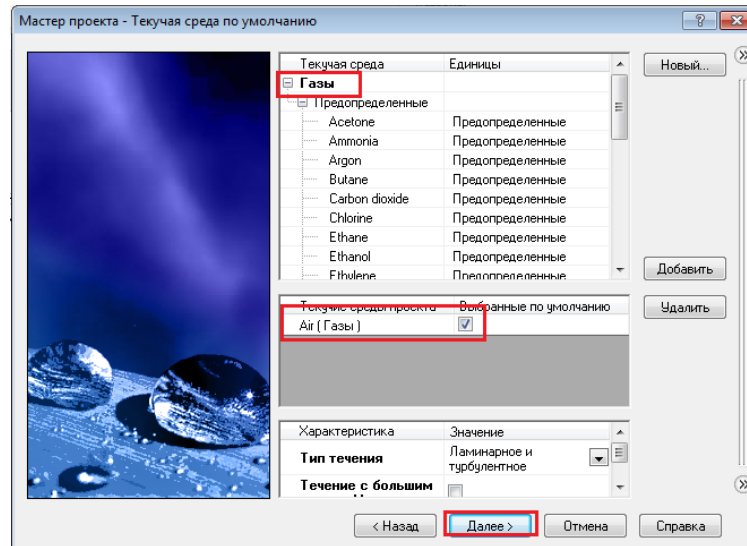


Рисунок 8.6 – Вікно «Текучая среда по умолчанию»

6. Вибір матеріалу твердого тіла.

У вікні «Материал по умолчанию» (Default solid) встановлюється матеріал всіх твердих тіл моделі. Якщо тіла мають інший матеріал, його назначають після закінчення роботи Майстра проектів. Для нашого прикладу необхідно розкрити розділ Alloys та натиснути Steel Stainless 321.

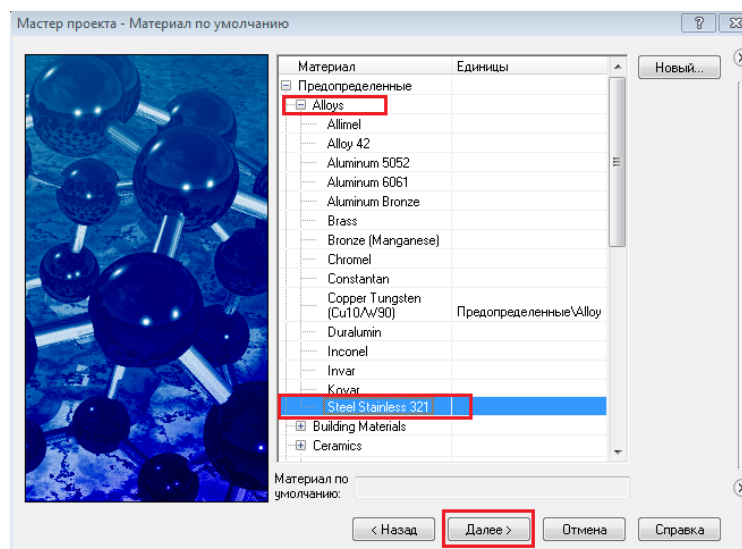


Рисунок 8.7 – Вікно «Материал по умолчанию»

7. Встановлення параметри стінок.

У вікні «Условия на стенках по умолчанию» (Default wall condition) у розділі «Теплообмен по умолчанию для внешних стен» (Default outer wall thermal condition) необхідно встановити значення «Коэффициент теплоотдачи» (Heat transfer coefficient) $5 \text{ W/m}^2/\text{C}$ ю

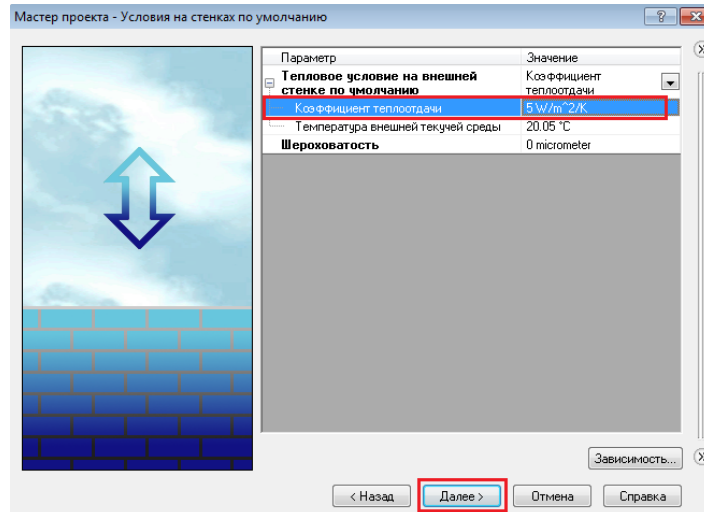


Рисунок 8.8 – Вікно «Условия на стенках по умолчанию»

8. Встановлення початкових умов.

У вікні «Начальные условия» (Initial condition) в розділі «Термодинамические параметры» (Thermodynamics parameters) в стовпці «Значение» (Value) рядку «Давление» (Pressure) необхідно ввести **2 atm**. Flow Simulation автоматично перетворює введене значення в обрану систему одиниць виміру (**202650 Pa**).

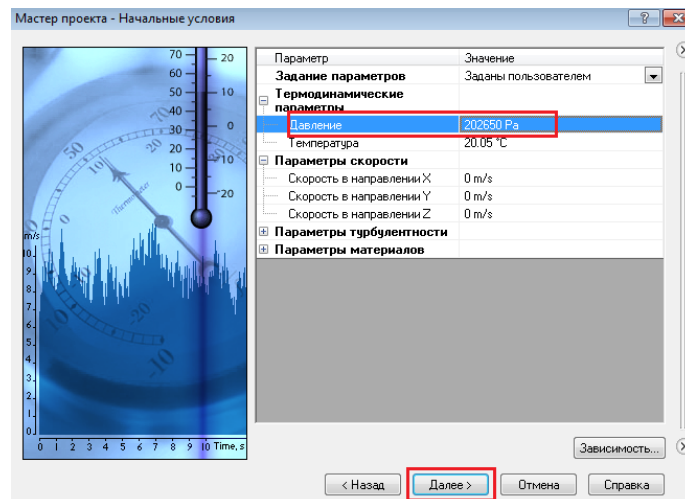


Рисунок 8.9 – Вікно «Начальные условия»

9. Встановлення дозволів та параметри геометрії.

У вікні «**Уровень разрешения**» (**Result and Geometry Resolution**) усі значення залишити за замочуванням.

Після натискання кнопки «**Завершение**» Flow Simulation створює нову конфігурацію *Каталізатор* і поміщає туди модель теплообмінника з встановленими параметрами.

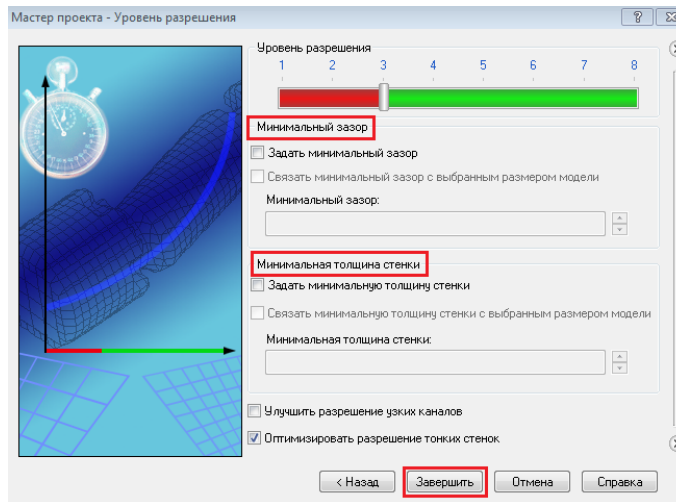


Рисунок 8.10 – Вікно «Уровень разрешения»

10. Накладання умов симетрії. Для накладання умов симетрії необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналізу» натиснути ПКМ на іконці «**Расчетная область**» (**Computational Domain**) і вибрати «**Изменить**» (**Edit Definition**).

2) У *Менеджері дослідження* (**Property Manager**) в рядку X_{max} ввести 0 і в випадаючому списку «**Граничные условия**» (**Boundary Condition**) для X_{max} вибрати «**Симетрия**» (**Symmetry**)

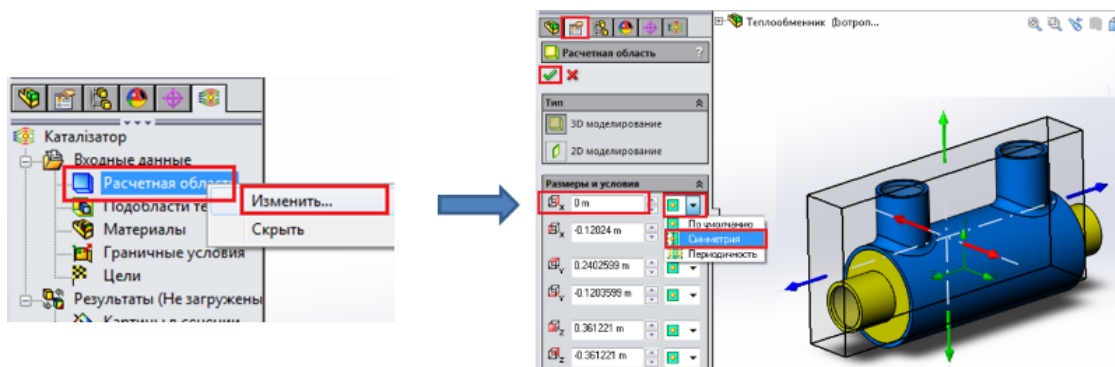


Рисунок 8.11 – Накладання умов симетрії

11. Встановлення підобласті текучого середовища. Для встановлення підобласті текучого середовища необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Підобласти течення» (**Fluid Subdomains**) і вибрати «Добавить подобласти течення» (**Insert Fluid Subdomains**).

2) У Менеджері дослідження (**Property Manager**) вказати внутрішню грань деталі «Крышка воздух входная».


3) Залишити значення за замовчуванням для **Системи координат (Coordinate System)** та **Вісі відліку (Reference axis)**.

4) У списку «Тип текучей среды» (**Fluid type**) вибрати «Газы/Реальные газы/Пар» (**Gases/Real Gases/Steam**). Оскільки Повітря (**Air**) було обране в помічнику як одне з **Текучих середовищ проекту (Project fluids)** і було обрано відповідний тип текучого середовища.

5) У графі **Fluids** Flow Simulation вказати тип текучого середовища і/або рідкі середовища для підобласті текучого середовища, а також характеристики потоку, що залежать від обраного типу текучого середовища.

6) У графі «Параметры течення» (**Flow Parameters**) в рядку **Velocity in Z Direction V_Z** ввести **-10**.

7) У графі «Термодинамические параметры» (**Thermodynamic parameters**) в рядку «Давление» (**Pressure**) ввести **1 atm** та в рядку «Температура» (**Temperature**) ввести **326.9**. Flow Simulation автоматично перетворить введені значення в обрану систему одиниць вимірювання.

8) Натиснути **ОК** . У **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент «Підобласть течення 1» (**Fluid Subdomain 1**).

9) Переіменувати «Підобласть течення 1» (**Fluid Subdomain 1**) в **Гаряче повітря**.

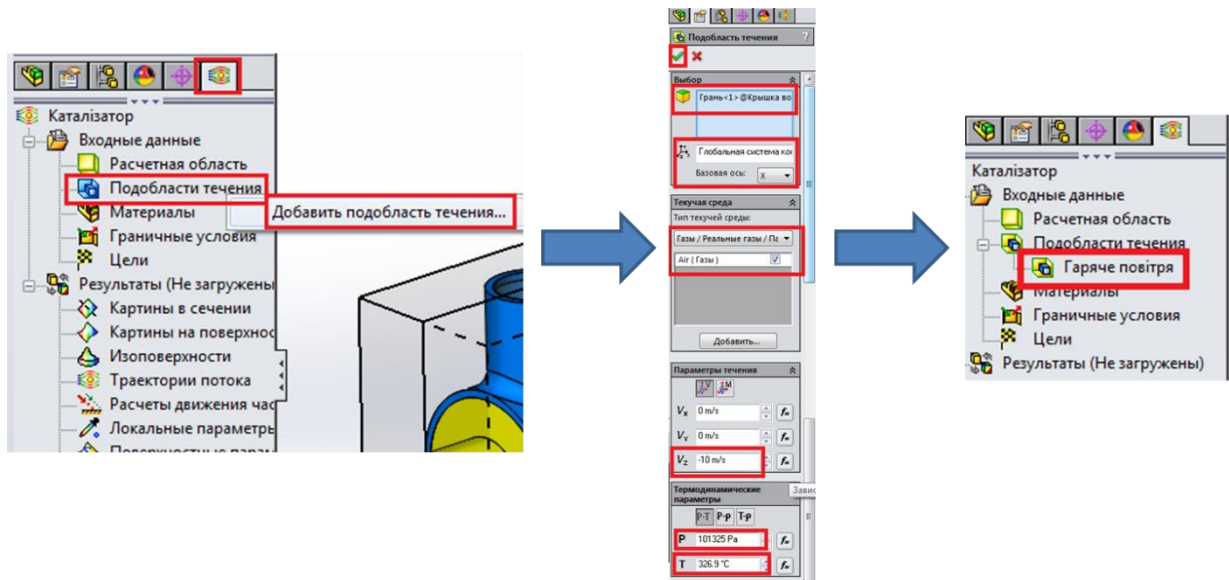


Рисунок 8.12 – Встановлення підобласті текучого середовища

12. Встановлення граничних умов. Вхід холодної води. Для встановлення граничних умов для вхідної холодної води необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналізу» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (**Boundary Conditions**) і вибрати «Добавить граничные условия» (**Insert Boundary Condition**).

2) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань деталі «Крышка вода входная <2>».

3) Залишити значення за замовчуванням для **Системи координат (Coordinate System)** та **Вісі відліку (Reference axis)**.

4) В розділі «Тип» (**Type**) натиснути «Расход/скорость» (**Flow Openings**) і вибрати «Массовый расход на входе» (**Inlet Mass Flow**).

5) В розділі «Параметры течения» (**Flow Parameters**) встановити значення «Массовый расход» (**Mass Flow Rate Normal to Face**) рівне **0.01 kg/s**.

6) Натиснути **ОК** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналізу» з'явиться новий елемент – «Массовый расход на входе 1» (**Inlet Mass Flow 1**).

7) Переіменувати «Массовый расход на входе 1» (**Inlet Mass Flow 1**) у **Вхід – вода холодна**.

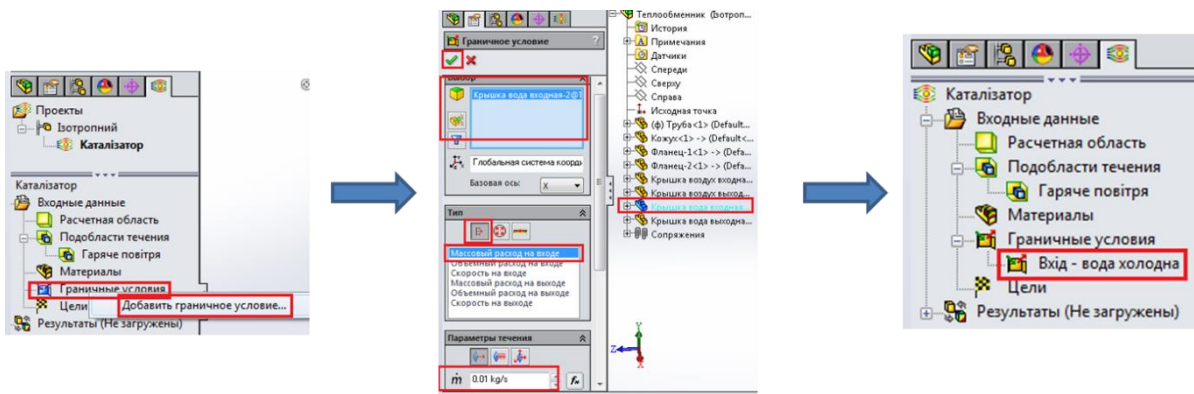


Рисунок 8.13 – Встановлення граничних умов для вхідної холодної ВОДИ

13. Встановлення граничних умов. Вихід гарячої води. Для встановлення граничних умов для вихідної гарячої води необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (**Boundary Conditions**) і вибрати «Добавить граничные условия» (**Insert Boundary Condition**).

2) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань деталі «Крышка вода выходная <2>».

3) Залишити значення за замовчуванням для Системи координат (**Coordinate System**) та Вісі відліку (**Reference axis**).

4) В розділі «Тип» (**Type**) натиснути «Давление» (**Pressure Openings**) і вибрати «Давление окружающей среды» (**Environment Pressure**). Усі інші параметри залишити без змін.

5) Натиснути **OK** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент – «Давление окружающей среды 1» (**Environment Pressure 1**).

6) Переіменувати «Давление окружающей среды 1» (**Environment Pressure 1**) у Вихід – вода гаряча.

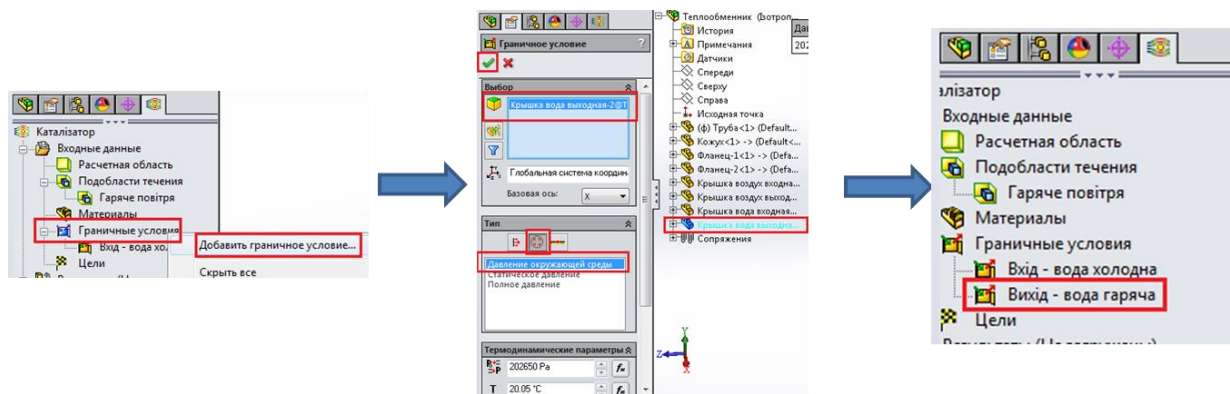


Рисунок 8.14 – Встановлення граничних умов для вихідної гарячої води

14. Встановлення граничних умов. Вхід гарячого повітря. Для встановлення граничних умов для вхідного гарячого повітря необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (**Boundary Conditions**) і вибрати «Добавить граничные условия» (**Insert Boundary Condition**).

2) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань деталі «Крышка воздуха входная <1>».

3) Залишити значення за замовчуванням для **Система координат (Coordinate System)** та **Вісі відліку (Reference axis)**.

4) В розділі «Тип» (**Type**) натиснути «Скорость на входе» (**Inlet Velocity**).

5) У рядку «Скорость по нормали к поверхности» (**Velocity Normal to Face**) ввести **10**.

6) Переглянути значення «Температура» (**Temperature**) (**326.9 °C**). Якщо воно відрізняється, виправити його. Всі інші параметри залишити за замовчуванням.

7) Натиснути **ОК** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент – «Скорость на входе 1» (**Inlet Velocity 1**)

8) Переіменувати «Скорость на входе 1» (**Inlet Velocity 1**) у **Вхід - повітря гаряче**.

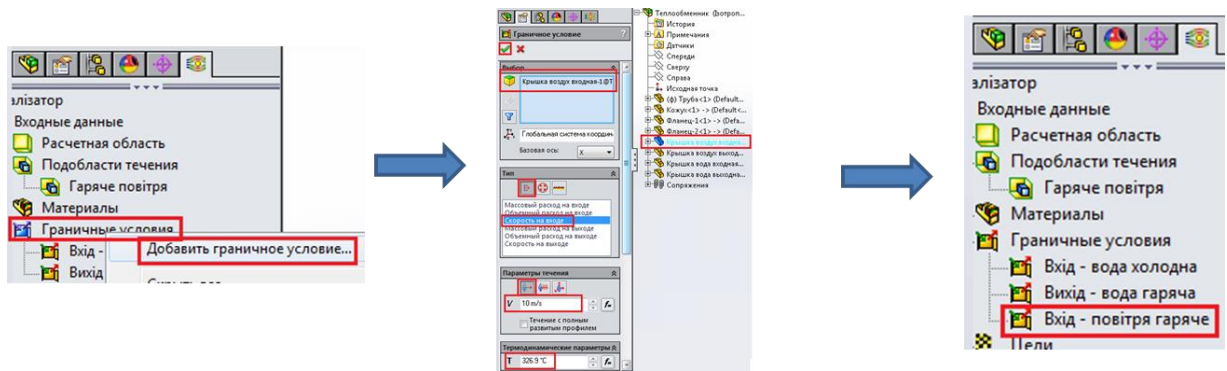


Рисунок 8.15 – Встановлення граничних умов для вхідного гарячого повітря

15. Встановлення граничних умов. Вихід холодного повітря. Для встановлення граничних умов для вихідного холодного повітря необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (**Boundary Conditions**) і вибрати «Добавить граничные условия» (**Insert Boundary Condition**).

2) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань деталі «Крышка воздуха выходная <1>».

3) Залишити значення за замовчуванням для Системи координат (**Coordinate System**) та Вісі відліку (**Reference axis**).

4) В розділі «Тип» (**Type**) натиснути «Давление» (**Pressure Openings**) і вибрати «Давление окружающей среды» (**Environment Pressure**). Усі інші параметри залишити без змін.

5) Переглянути значення «Давление окружающей среды» (**Environment Pressure**) (**101325 Pa**) і «Температура» (**Temperature**) (**326.9 °C**). Якщо воно відрізняється, виправити його. Всі інші параметри залишити за замовчуванням.

6) Натиснути **ОК** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент – «Давление окружающей среды 1» (**Environment Pressure 1**).

7) Переіменувати «Давление окружающей среды 1» (**Environment Pressure 1**) у **Вихід - повітря холодне**.

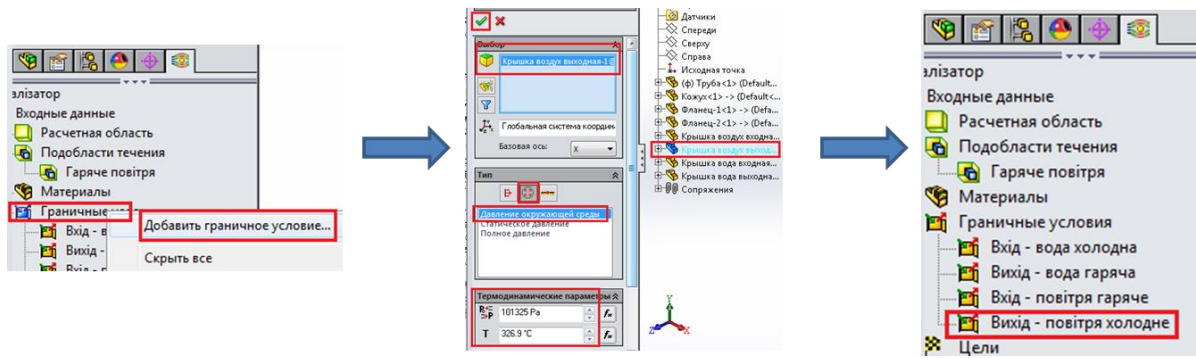


Рисунок 8.16 – Встановлення граничних умов для вихідного холодного повітря

16. Створення та присвоєння нового матеріалу кожному компоненту моделі. Для того, щоб присвоїти кришкам властивості ізолятора необхідно:

1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналізу» натиснути ПКМ на іконці «Матеріали» (**Solid Materials**) і вибрати «Добавить материал» (**Insert Solid Material**).

2) У спливаючому дереві **FeatureManager design** виділити всі кришки.

3) В графі «Матеріали» (**Solid**) розкрити список матеріалів «Предопределенные» (**Pre-Defined**) і в графі **Glasses & Minerals** вибрати матеріал **Insulator**.

4) Натиснути **OK** ✓.

5) Переіменувати «**Insulator Материал 1**» (**Insulator Solid Material 1**) в **Кришки - Ізолятор**.

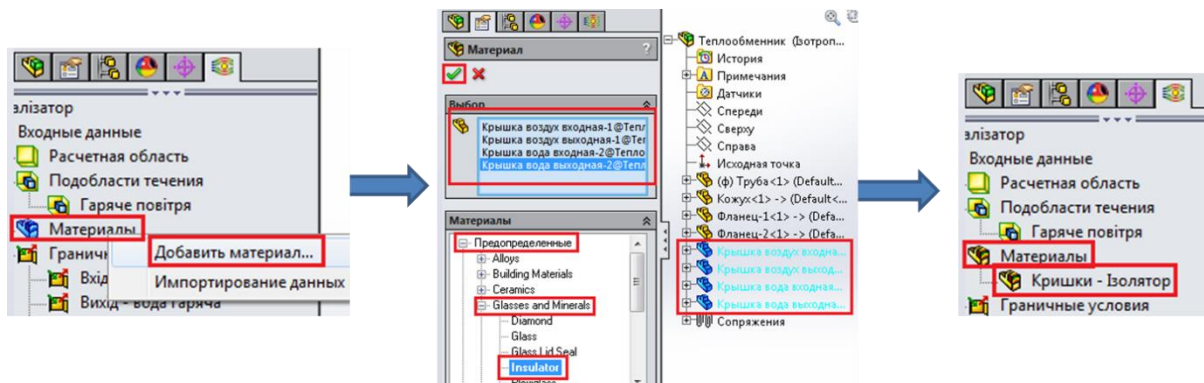


Рисунок 8.17 – Створення та присвоєння нового матеріалу кожному компоненту моделі

17. Вказування об'ємних, поверхневих та глобальних цілей.

Для встановлення об'ємної цілі необхідно:

- 1) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналізу» натиснути ПКМ на іконці «Цілі» (Goals) і вибрати «Добавить объемные цели» (Insert Volume Goals).
- 2) У спливаючому дереві **FeatureManager design** виділити деталь «Труба».
- 3) У таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець «Ср» (Av) для рядка «Температура (твердое тело)» (Temperature of Solid).
- 4) Залишити включеною опцію «Исп. Для сход.» (Use for Conv.), щоб використовувати ціль для контролю конвергенції.
- 5) У графі «Имя шаблона» (Name template) ввести **VG Av T of Tube**.
- 6) Натиснути **OK** ✓.

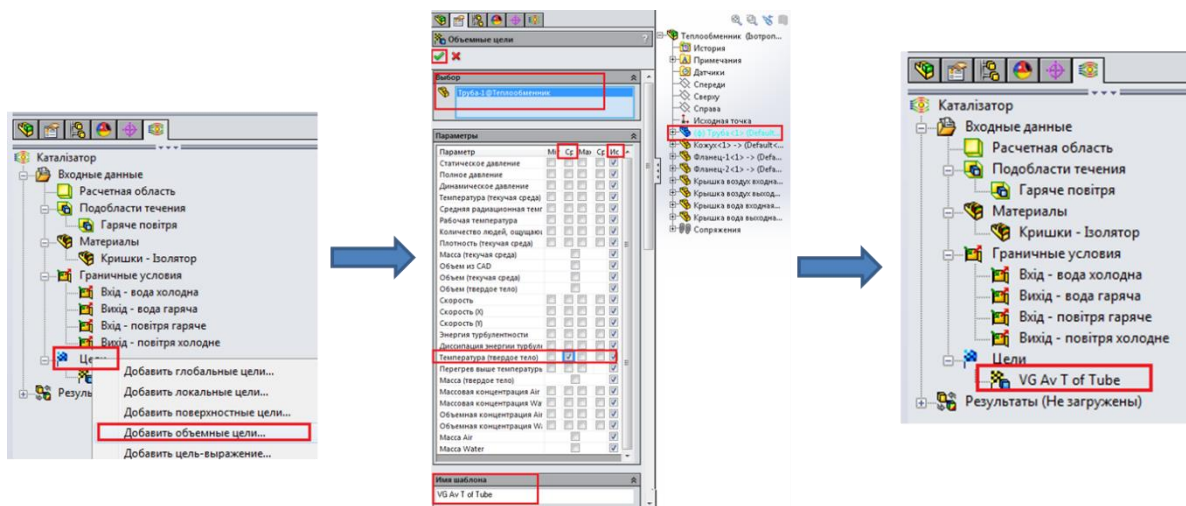


Рисунок 8.18 – Вказування об'ємних, поверхневих та глобальних цілей

18. Розрахунки та їх результати.

Для запуску розрахунку необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Расчет» (Solve) → «Запустить» (Run).
- 2) Натиснути кнопку «Запустить» (Run).

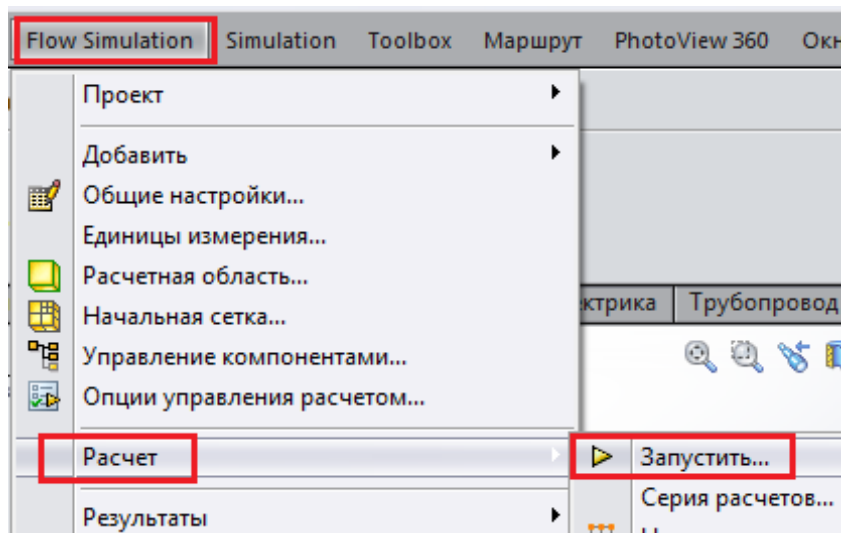


Рисунок 8.19 – Запуск моделі на розрахунок

19. Перегляд цілей.

Для перегляду цілей розрахунку необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

2) В діалоговому вікні «Цели» (Goals) поставити прапорець навпроти **VG Av T of Tube**.

3) Натиснути ОК .

4) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Экспортировать в эксель» (Export to Excel).

5) В папці з результатами розрахунків з'явиться Excel файл з результатами по цілям.

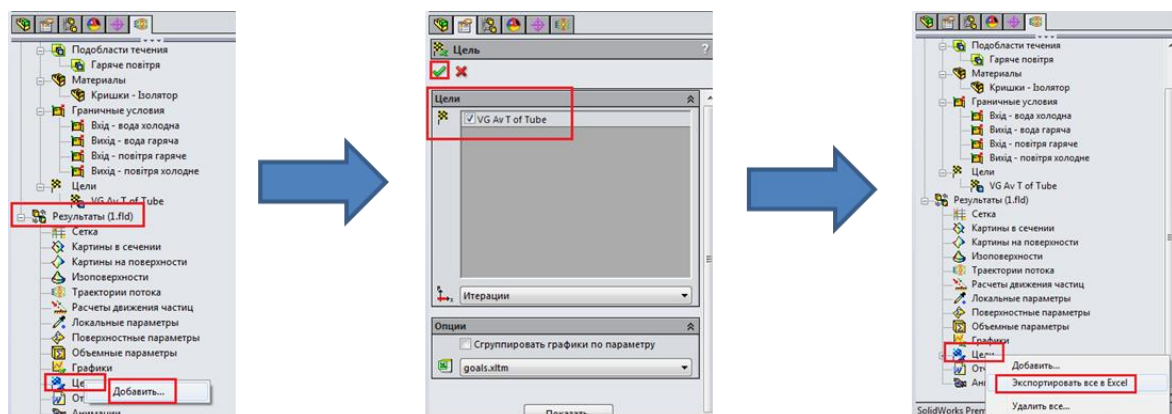

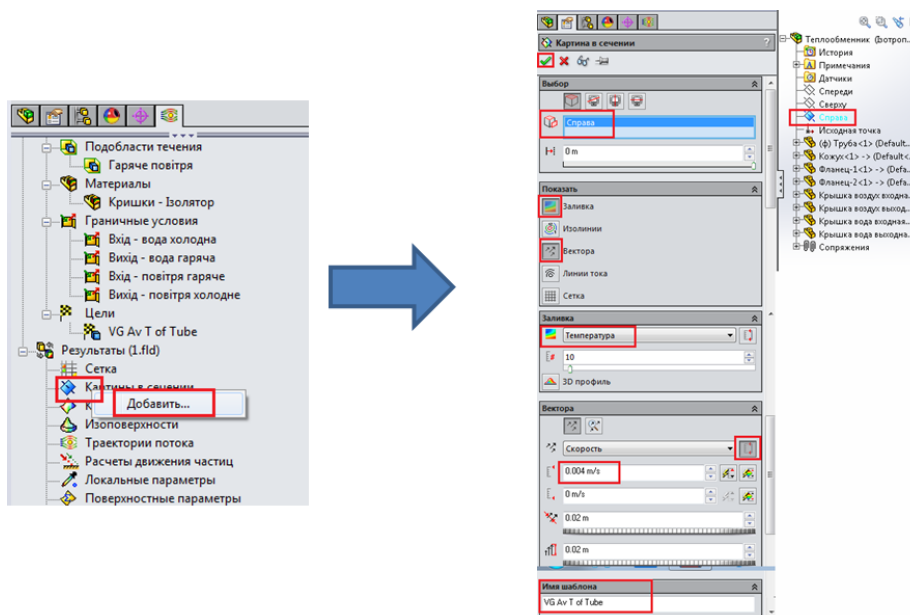


Рисунок 8.20 – Перегляд цілей

20. Створення січної площини.

Для створення січної площини необхідно:

- 1) На панелі інструментів **Flow Simulation** в розділі «Результаты» (**Results**) натиснути ПКМ по «Картины и сечения» (**Cut Plot**) і вибрати «Добавить» (**Insert**).
- 2) У спливаючому вікні **FeatureManager design** вибрати «Справа» (**Plane3**).
- 3) У діалоговому вікні «Картины и сечения» (**Cut Plot**) на додаток до відображення «Заливка» (**Contours**) вибрати «Вектора» (**Vectors**).
- 4) На вкладці «Заливка» (**Contours**) вибрати «Температура» (**Temperature**).
- 5) Натиснути кнопку «Корректировать Минимум и Максимум» (**Adjust Minimum and Maximum**) і ввести значення максимальної швидкості **0.004 m/s**.
- 6) Натиснути ОК . Буде створена січна площина, але її перекриває модель.
- 7) Натиснути «Вид справа» (**Right**) на панелі інструментів **Standard Views**.
- 8) На панелі інструментів **Flow Simulation Display** натиснути «Геометрия» (**Geometry**), щоб приховати модель.



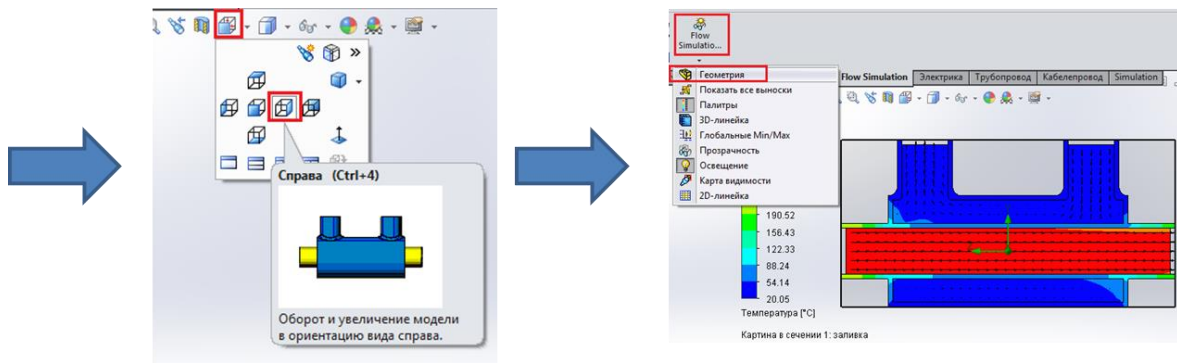



Рисунок 8.21 – Створення січної площини

21. Відображення траєкторій потоку.

Для відображення траєкторій потоку необхідно:

- 1) На панелі інструментів **Flow Simulation** в розділі «Результаты» (**Results**) натиснути ПКМ по «Траектории потока» (**Flow Trajectories**) і вибрати «Добавить» (**Insert**).
- 2) У спливаючому вікні **FeatureManager design** вибрати «Крышка вода входная» .
- 3) На вкладці «Представление» (**Appearance**) вибрати «Скорость» (**Velocity**).
- 4) Натиснути кнопку «Корректировать Минимум и Максимум» (**Adjust Minimum and Maximum**) і ввести значення максимальної швидкості **0.004** m/s.
- 5) Натиснути ОК  .
- 6) На панелі інструментів **Flow Simulation Display** натиснути «Прозрачность» (**Transparency**), щоб змінити прозорість всієї збірки та покращити візуальні параметри відображення.

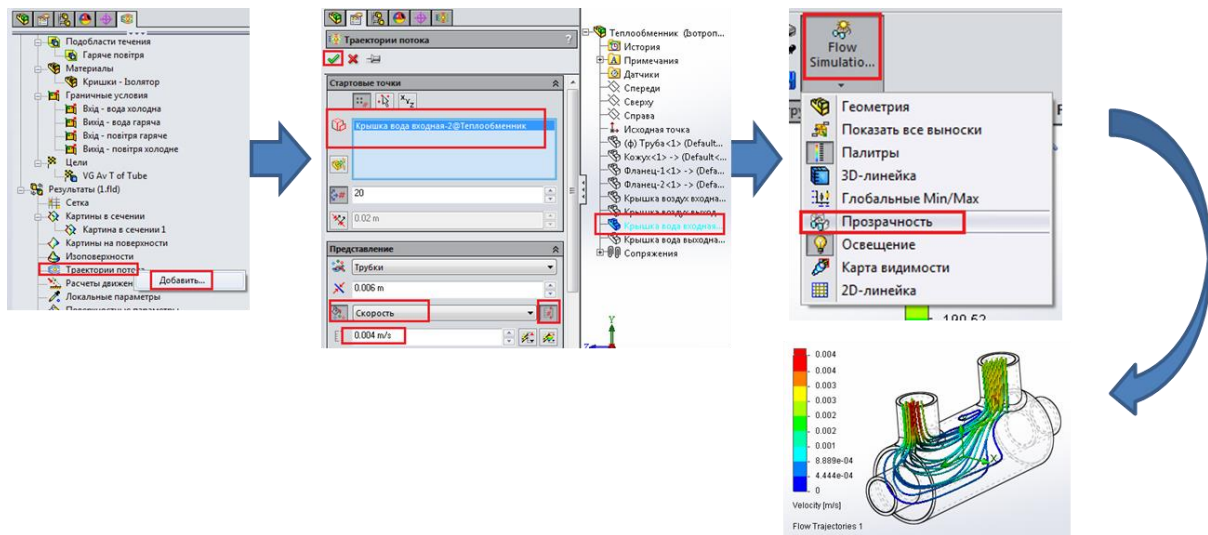


Рисунок 8.22 – Відображення траекторій потоку

22. Розрахунок параметрів поверхні.

Для розрахунку параметрів поверхні необхідно:

- 1) На панелі інструментів **Flow Simulation** в розділі «Результаты» (**Results**) натиснути ПКМ по «Поверхностные параметры» (**Surface Parameters**) і вибрати «Добавить» (**Insert**).
- 2) У спливаючому вікні **FeatureManager design** вибрати «Крышка вода выходная» .
- 3) Вибрати «Рассмотреть всю модель» (**Consider entire model**), щоб врахувати **умови симетрії (Symmetry)** і побачити значення розрахованого параметра для всієї моделі, а не для її половини.
- 4) На вкладці «Параметри» (**Parameters**) вибрати «Температура (текущая среда)» (**Temperature (Fluid)**).
- 5) Після натискання кнопки «Показать» (**Show**) **Flow Simulation** відобразить середнє значення температури **29.12 °C**.

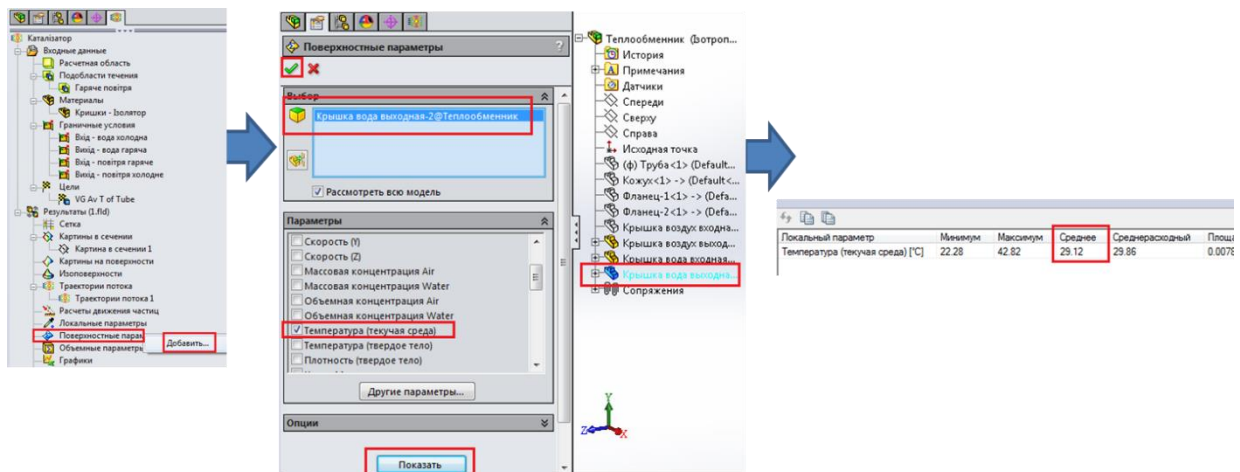


Рисунок 8.23 – Розрахунок параметрів поверхні

23. Розрахунок параметрів поверхні.

Для розрахунку параметрів поверхні необхідно:

- 1) На панелі інструментів **Flow Simulation** в розділі «Результаты» (**Results**) натиснути ПКМ по «Поверхностные параметры» (**Surface Parameters**) і вибрати «Добавить» (**Insert**).
- 2) У спливаючому вікні **FeatureManager design** вибрати «Крышка воздуха выходная» .
- 3) Вибрати «Рассмотреть всю модель» (**Consider entire model**), щоб врахувати **умови симетрії (Symmetry)** і побачити значення розрахованого параметра для всієї моделі, а не для її половини.
- 4) На вкладці «Параметры» (**Parameters**) вибрати «Температура (текущая среда)» (**Temperature (Fluid)**).
- 5) Після натискання кнопки «Показать» (**Show**) **Flow Simulation** відобразить середнє значення температури **308.76 °C**.

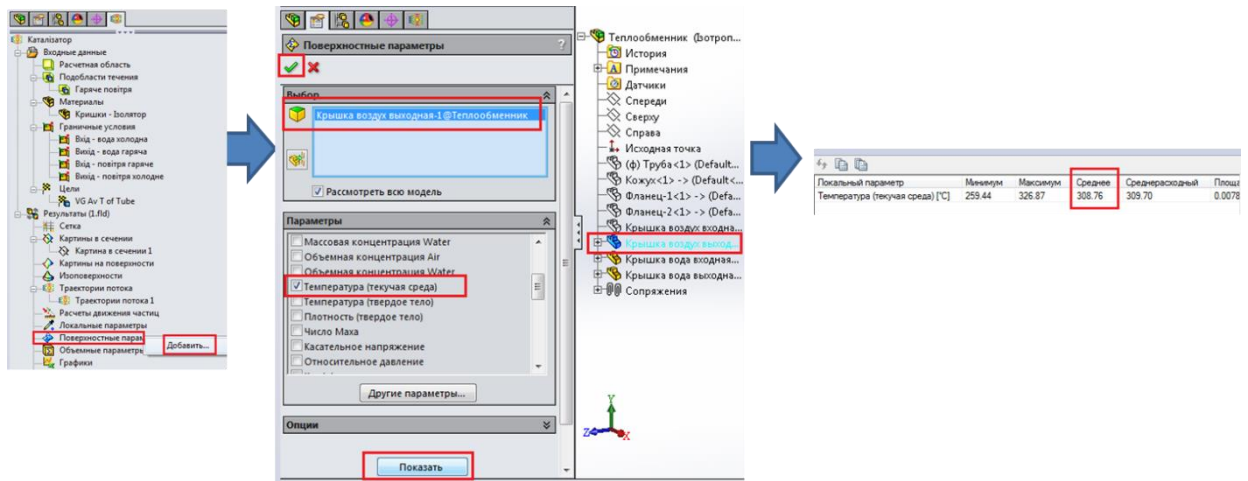


Рисунок 8.24 – Розрахунок параметрів поверхні

24. Розрахунок ефективності теплообмінника.

З урахуванням того, що коефіцієнт потужності повітря менше коефіцієнта потужності води, ККД теплообмінного апарату складе:

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{горяч}}^{\text{ВХ}} - T_{\text{горяч}}^{\text{ВИХ}}}{T_{\text{горяч}}^{\text{ВХ}} - T_{\text{хол}}^{\text{ВХ}}} = \frac{326,87 - 308,76}{326,87 - 29,12} = 0,06$$

8.6. Контрольні запитання

1. Як розраховується фактична теплопередача?
2. Як розраховується максимальна теплопередача?
3. Як розраховується ККД теплообмінника?

Практична робота №9

Розрахунок пористих тіл в SolidWorks Flow Simulation

Мета та основні завдання: Виробити у студентів уміння і навички розрахунку пористих тіл в програмному комплексі SolidWorks. Виконати експериментальне порівняння характеристик пористих мас автомобільних каталізаторів SolidWorks Flow Simulation

Завдання¹. Розглянути поняття пористості. Розрахунок пористості.

9.1. Короткі теоретичні відомості

Пористість – характеристика матеріалу, що визначає розмір і кількість пір в твердому тілі. Рух текучого середовища через пористе середовище в твердій фазі називають **фільтрацією**. Пористі середовища можуть мати природний і штучний характер утворення.

Дослідження пористих матеріалів вкрай важливо в багатьох областях науки і техніки. Характеристики пористості використовуваних речовин і матеріалів впливають на ефективність технологій, що використовуються в машинобудуванні, будівництві, хімічній, харчовій промисловості, біотехнологіях і т.д.

Пористість визначають за формулою:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_t}\right) 100\%$$

ρ_v - дійсна густина матеріалу (без пор), кг/м³;

ρ_t – густина матеріалу з порами (m – маса, v – об'єм зразка), кг/м³

На прикладі розглянемо рух потоку крізь секцію автомобільної вихлопної труби, в якій руху вихлопних газів перешкоджають два пористих тіла, які служать каталізаторами для перетворення шкідливого оксиду вуглецю в діоксид вуглецю. При проектуванні автомобільного каталізатора

¹ Відповіді на зазначені теоретичні питання занести в протокол при підготовці до виконання практичної роботи.

інженер повинен знайти компроміс між мінімізацією опору, створюваного каталізатором по відношенню до вихлопних газів, зростаючого зі збільшенням площі поверхні контакту каталізатора, і тривалістю контакту вихлопних газів з каталізатором. Тому більш рівномірний розподіл потоку вихлопних газів по перетину каталізатора сприяє підвищенню його працездатності.

Інструмент Porous media здатний імітувати структуру каталізатора, що дає можливість моделювати об'єм, який займає каталізатор, як область розподіленого опору замість безпосереднього моделювання всіх порожнин всередині каталізатора, що може бути недоцільно або навіть неможливим. У цьому прикладі ми розглянемо вплив типу проникності пористих тіл (ізотропна і односпрямована середа), при однаковому опорі потоку, на розподіл потоку вихлопних газів по перетину каталізатора. Спостерігаючи за поведінкою траєкторій потоку вихлопних газів, розподілених рівномірно по вхідному отвору моделі і які проходять крізь пористий каталізатор, ми побачимо, як тип проникності впливає на поведінку потоку. Крім того, зафарбовування траєкторій в залежності від швидкості потоку дає можливість оцінити час, протягом якого вихлопні гази знаходяться в пористому каталізаторі, що також важливо з точки зору ефективності каталізатора.

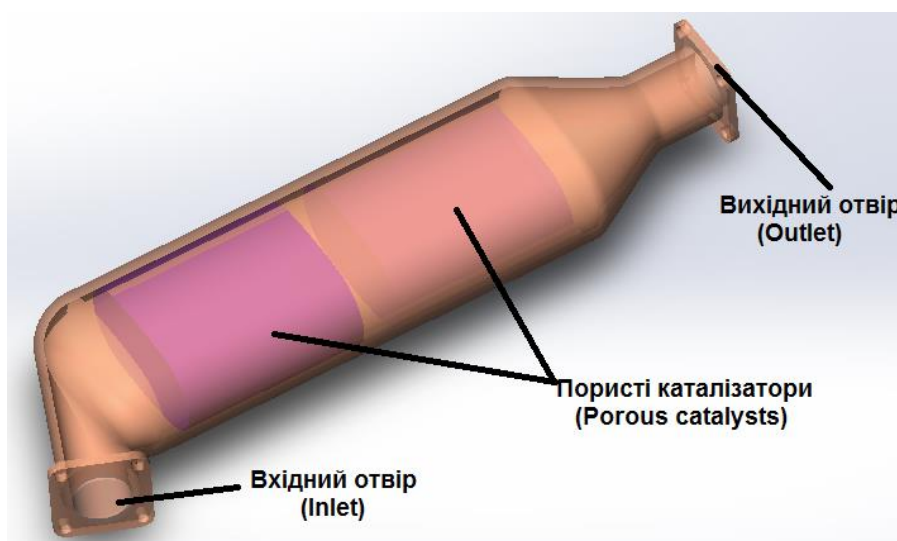


Рисунок 9.1 – Будова частини вихлопної труби із каталізаторами

9.2. Опис практичних засобів та обладнання

Практична робота виконується на персональному комп'ютері стандарту IBM PC під керуванням операційної системи MS Windows зі стандартним пакетом MS Office та програмним комплексом SolidWorks.

9.3. Заходи безпеки під час виконання практичної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні даної практичної роботи, наведені у додатку А.

9.4. Послідовність виконання роботи

1. Відповідно до отриманого варіанту завдання в програмному комплексі SolidWorks виконати розрахунок двох типів пористих мас автомобільних каталізаторів (рисунок. 9.1): однонаправленої та ізотропної.

2. Визначенню підлягає перепад тиску та корисний об'єм пористої маси.

3. Розрахунок проводиться при стандартних атмосферних умовах $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 101325\text{ Па}$.

4. Граничні умови роботи каталізатора та пористість його робочого тіла встановлюються відповідно до отриманого варіанту завдання.

5. Після проведення розрахунків продемонструвати результати роботи викладачу.

6. Оформити протокол практичної роботи.

9.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

При оформленні звіту з практичної роботи до заздалегідь підготовленого протоколу (див. завдання до практичної роботи) додається:

– роздруковані аркуші з результатами виконаної роботи;

– опис по етапах розрахунку двох типів пористих мас автомобільних каталізаторів.

Приклад виконання практичної роботи.

Вихідні данні: Необхідно виконати розрахунок двох типів пористих мас автомобільних каталізаторів: однонаправленої та ізотропної (рисунок. 9.1).

Швидкість газів на вході в каталізатор– 10 м/с.

Пористість робочого тіла – 0,5.

Послідовність виконання дослідження:

1. Підготовка моделі. Для підготовки моделі до дослідження необхідно:
1) Запустити програмний комплекс SolidWorks.
2) Через меню «Файл» → «Открыть» відкрити надану викладачем модель.

2. Створення проекту. Для створення нового проекту необхідно:
1) В меню **Flow Simulation** або в Менеджері команд вибрати «Проект» (Project) → «Мастер проекта» (Wizard)

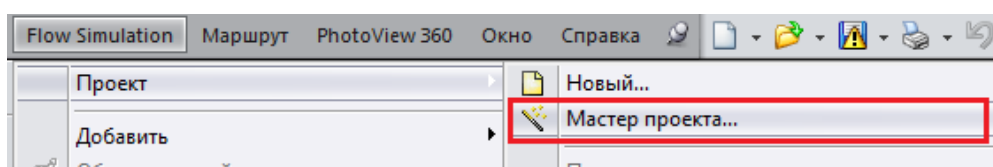


Рисунок 9.2 – Створення нового проекту

2) У вікні «Мастер проекта» (Wizard), що з'явиться, необхідно вказати ім'я проекту **Каталізатор**, ім'я конфігурації **Ізотропний** та вибрати конфігурацію «Создать новую» (Create new) і натиснути кнопку «Далее». Flow Simulation створить нову конфігурацію і збереже всі дані в новій папці.

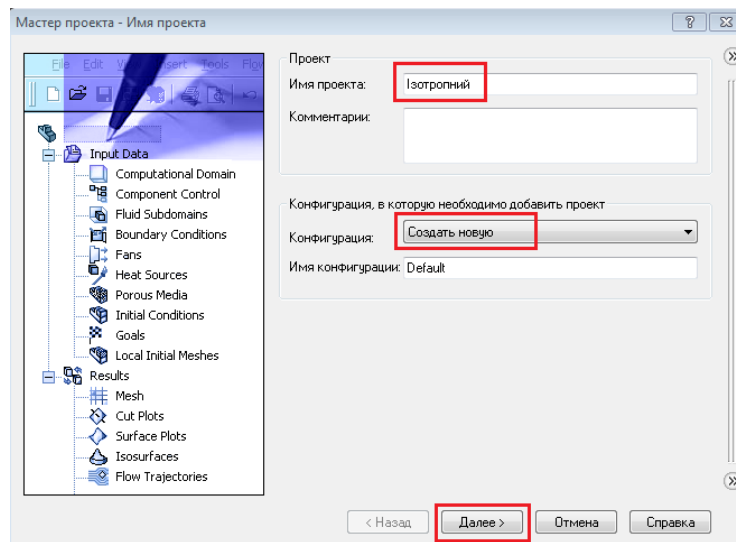


Рисунок 9.3 – Вікно «Мастер проекта» (Wizard)

3) В наступному вікні «Система единиц измерения» (Unit System) виділити існуючу систему одиниць **SI (m-k-g-s)** та змінити одиниці виміру температури на $^{\circ}\text{C}$.

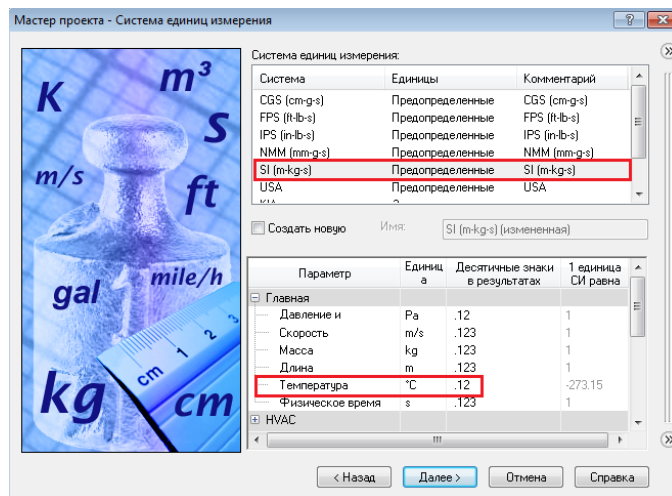



Рисунок 9.4 – Вікно «Система единиц измерения»

Для цього проекту налаштування за замовчуванням підходять ідеально і все що потрібно це вибрати «Воздух» (Air) в якості текучого середовища. Щоб швидко отримати доступ до потрібної сторінки помічника необхідно скористатися навігатором (Navigator).

Для виклику навігатора необхідно натиснути розташовану в правому верхньому куті стрілку .

- 3) На панелі навігатору вибрати розділ «Текучая среда» (Fluids).
- 4) Відкрити розділ «Газы» (Gases) і виділити «Воздух» (Air) і натиснути кнопку «Добавить» (Add).
- 5) Натиснути «Завершение» (Finish) на панелі навігатора
- 6) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконці «Расчетная область» (Computational Domain) і вибрати «Скрыть» (Hide), щоб приховати каркасний ящик.

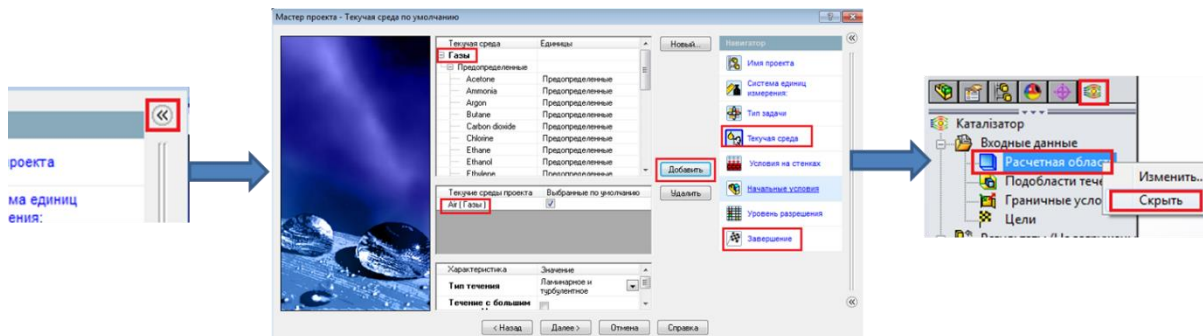


Рисунок 9.5– Вікно «Текучая среда по умолчанию»

3. Встановлення граничних умов.

За умовами завдання через вхідний отвір в каталізатор надходить повітря зі швидкістю 10 м/с. На виході з каталізатора тиск дорівнює атмосферному.

Для встановлення граничних умов необхідно:

- 1) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (Boundary Conditions) і вибрати «Добавить граничные условия» (Insert Boundary Condition).

- 2) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань вхідної кришки.

- 3) В розділі «Тип» (Type) натиснути «Расход/скорость» (Flow Openings) і вибрати «Скорость на входе» (Inlet Velocity).

- 4) В розділі «Параметры течения» (Flow Parameters) встановити значення «Скорость по нормали к поверхности» (Velocity Normal to Face) рівне 10 м/с.

5) Натиснути **ОК** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент – «Скорость на входе 1» (Inlet Velocity 1).

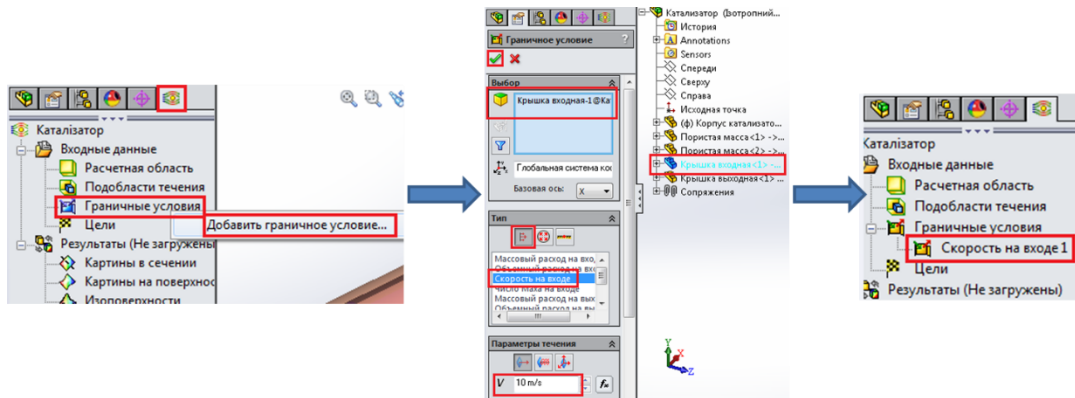


Рисунок 9.6 – Встановлення граничних умов «Расход/скорость» (Flow Openings)

6) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» натиснути ПКМ на іконці «Граничные условия» (Boundary Conditions) і вибрати «Добавить граничные условия» (Insert Boundary Condition).

7) У дереві *FeatureManager design* вибрати внутрішню грань вихідної кришки.

8) В розділі «Тип» (Type) натиснути «Давление» (Pressure Openings) і вибрати «Статическое давление» (Static Pressure).

9) Натиснути ОК. У дереві **Flow Simulation** «Дерево аналіза» з'явиться новий новий елемент – «Статическое давление 1» (Static Pressure 1).

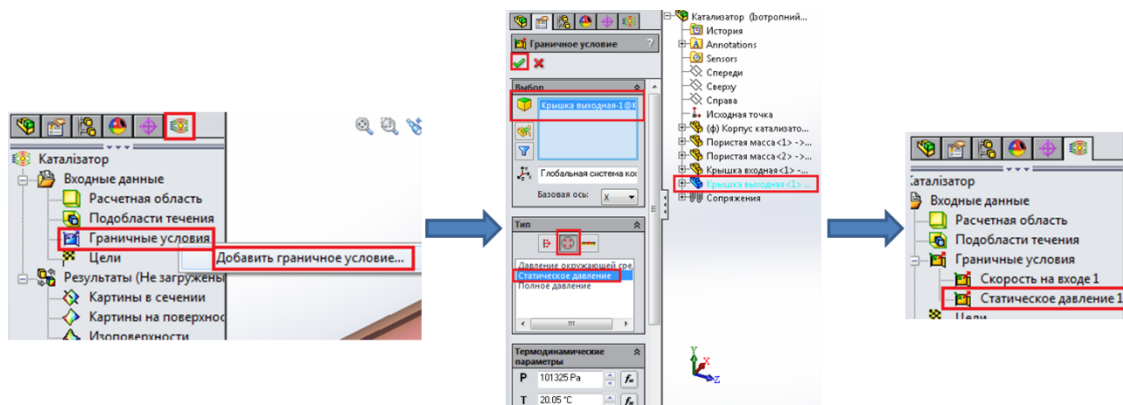


Рисунок 9.7 – Встановлення граничних умов «Давление» (Pressure Openings)

4. Створення ізотропного пористого середовища.

Пористі матеріали знаходяться в Інженерній базі даних в розділі Porous Media. Для нашого прикладу створимо новий матеріал **Ізотропний**.

Для створення нового матеріалу необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «**Инструменты**» (**Tools**) → «**Инженерная база данных**» (**Engineering Database**).

2) У дереві бази знань вибрати «**Порисунктая среда**» (**Porous Media**) → «**Заданы пользователем**» (**User Defined**). Натиснути ПКМ та вибрати «**Новый элемент**».

3) У вікні властивостей матеріалу ввести наступні дані:

«**Имя**» (**Name**) – **Изотропный**

«**Комментарий**» (**Comments**) – (не заповнюється)

«**Порисунктость**» (**Porosity**) – 0.5

«**Тип проницаемости**» (**Permeability type**) – **Изотропная**

«**Форма задания сопротивления**» (**Resistance calculation formula**) –
Перепад давления, расход, размеры (**Pressure drop, Flowrate, Dimensions**)

«**Перепад давления относительно расхода**» (**Pressure drop vs. Flowrate**) – **Массовый расход** (**Mass Flow Rate**)

«**Длина**» (**Length**) – 0.1 m

«**Площадь**» (**Area**) – 0.01 m²

Інші поля не заповнюються.

4) Перейти на вкладку «**Таблицы и графики**» (**Tables and Curves**) та в таблиці в стовпці «**Массовый расход**» (**Masse flow rate**) вести значення 0 kg/s та 0.01 kg/s, а в стовці «**Перепад давления**» (**Pressure difference**) – 0 Pa та 20 Pa.

5) Натиснути «**Сохранить**» (**Save**) 

6) Натиснути «**Файл**» (**File**) → «**Выход**» (**Exit**), щоб вийти з бази даних.

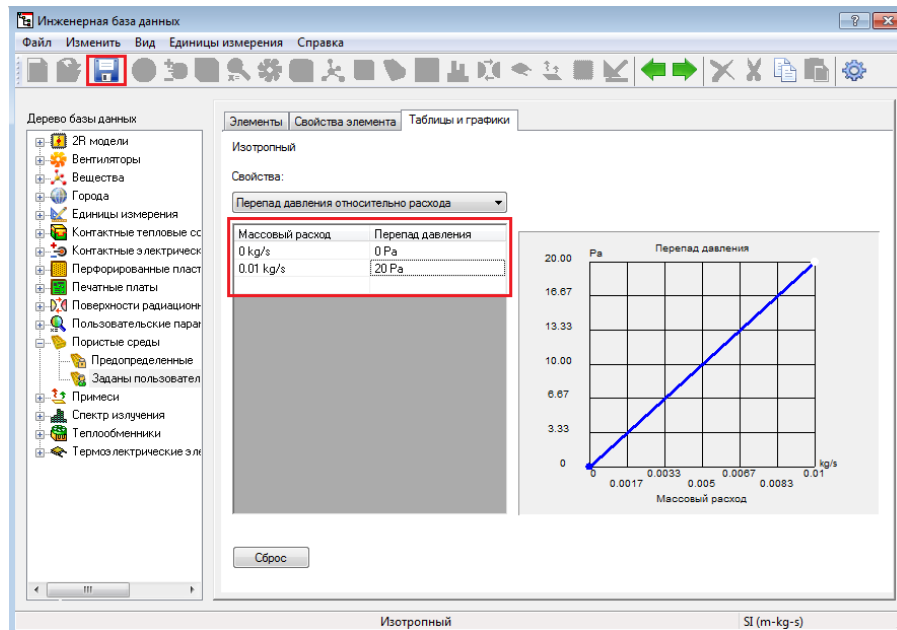
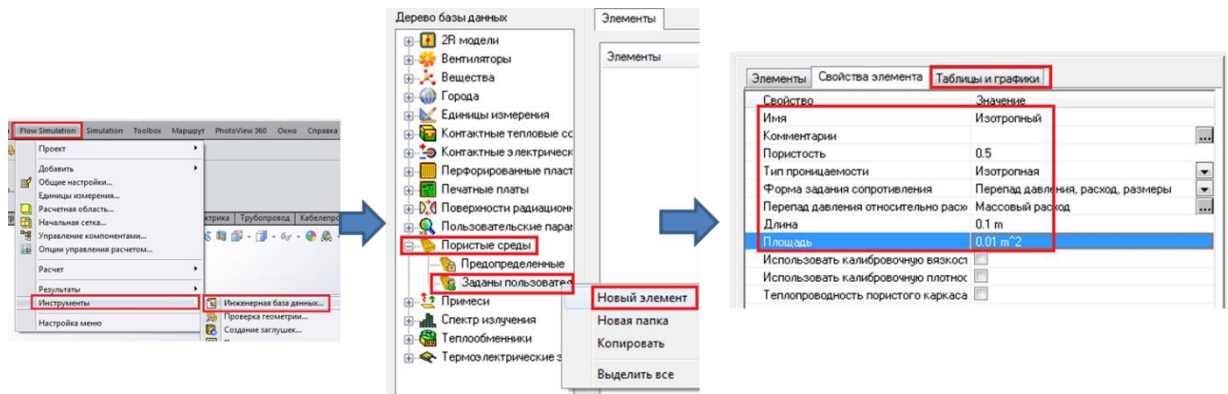


Рисунок 9.8 – Створення ізоотропного пористої середовища

5. Встановлення пористої середовища. Для того, щоб встановити пористе середовище ізоотропного типу необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Добавить» (**Insert**) → «Порисуюктая среда» (**Porous Media**).

2) У дереві *Feature Manager design* виділити «Порисуюктая маса <1>», «Порисуюктая маса <2>».

3) В графі «Материалы» (**Solid**) розкрити пункт «Заданы пользователем» (**User Defined**) і вибрати «Изоотропный».

4) Натиснути **OK** . У дереві **Flow Simulation** «Дерево анализа» з'явиться новий новий елемент – «Порисуюктая среда 1» (**Porous Media 1**).

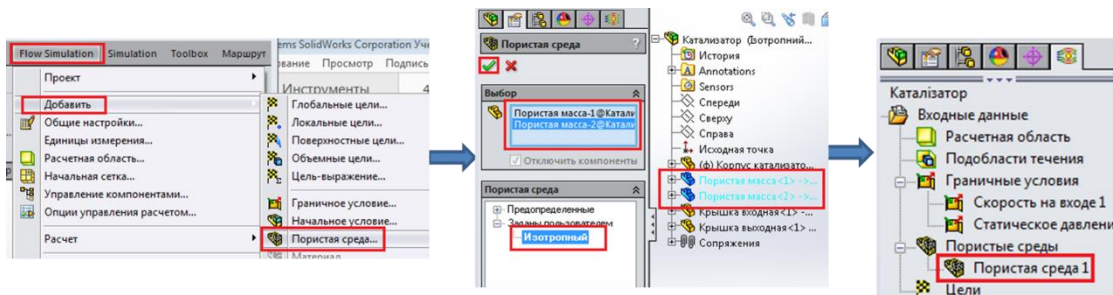


Рисунок 9.9 – Встановлення пористого середовища

6. Вказування поверхневих цілей. Для того, щоб вказати поверхневі цілі необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить поверхностные цели» (Insert Surface Goals).

2) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» вибрати елемент «Скорость на входе 1», щоб виділити внутрішню грань кришки вхідного отвору.

3) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець «Ср» (Av) для рядка «Полное давление» (Total Pressure).

4) Залишити активованою опцію «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використовувати цю ціль для контролю конвергенції.

5) У графі «Имя шаблона» (Name Template), розташованій внизу PropertyManager, натиснути кнопку «Вход» (Inlet) <+>.

6) Натиснути ОК . З'явиться нова ціль «ПЦ ВходСр Полное давление 1».

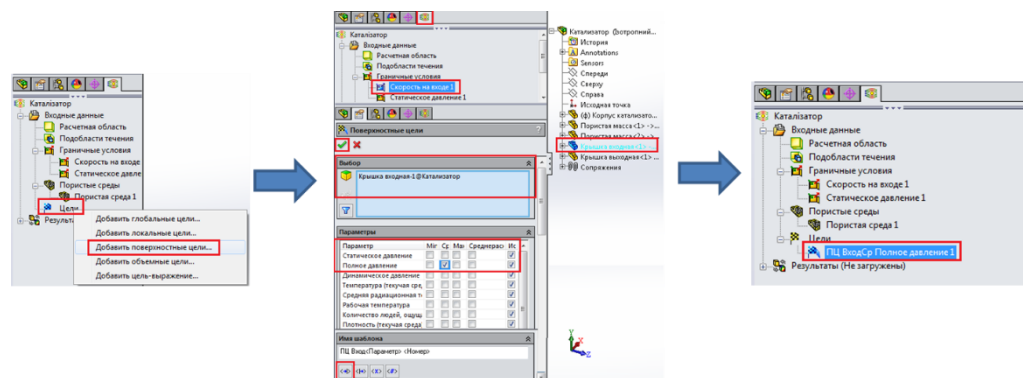


Рисунок 9.10 – Вказування поверхневих цілей

7) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить поверхностные цели» (Insert Surface Goals).

8) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» вибрати елемент «Статическое давление 1», щоб виділити внутрішню грань кришки вихідного отвору.

9) В таблиці «Параметры» (Parameter) вибрати стовпець «Ср» (Av) для рядка «Полное давление» (Total Pressure).

10) Залишити активованою опцію «Исп.для.сход.» (Use for Conv.) («Использовать для контроля сходимости» (Use for Convergence Control)), щоб використувувати цю ціль для контролю конвергенції.

11) У графі «Имя шаблона» (Name Template), розташованої внизу PropertyManager, натиснути кнопку «Выход» (Inlet) $\langle \rightarrow \rangle$.

12) Натиснути ОК \checkmark . З'явиться нова ціль «ПЦ ВыходСр Полное давление 1».

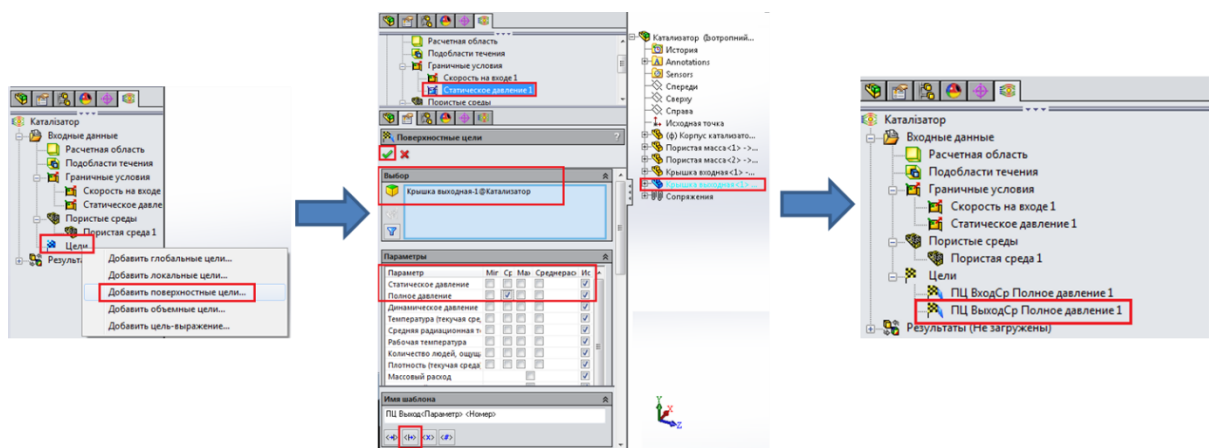



Рисунок 9.11 – Вказування поверхневих цілей

7. Вказування цілі, що керується рівнянням. Для того, щоб вказати цілі, що керуються рівнянням необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) і вибрати «Добавить цель-выражение» (Insert Equation Goal).

2) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» вибрати «ПЦ ВыходСр Полное давление 1». Елемент з'явиться в графі «Выражение» (Expression).

- 3) Натиснути на калькуляторі кнопку мінус "-".
- 4) У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» вибрати «ПЦ ВыходСр Полное давление 1».
- 5) У списку «Размерность» (**Dimensionality**) залишити значення «Давление и напряжение» (**Pressure & Stress**).
- 6) Натиснути ОК . З'явиться нова ціль «Цель-выражение 1».

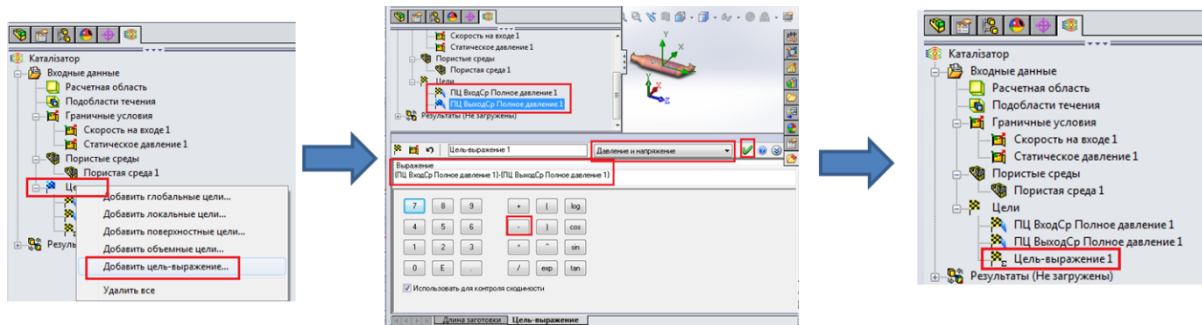


Рисунок 9.12 – Вказування цілі, що керується рівнянням

8. Розрахунки та їх результати.

Для запуску розрахунку необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Расчет» (Solve) → «Запустить» (Run).
- 2) Натиснути кнопку «Запустить» (Run).

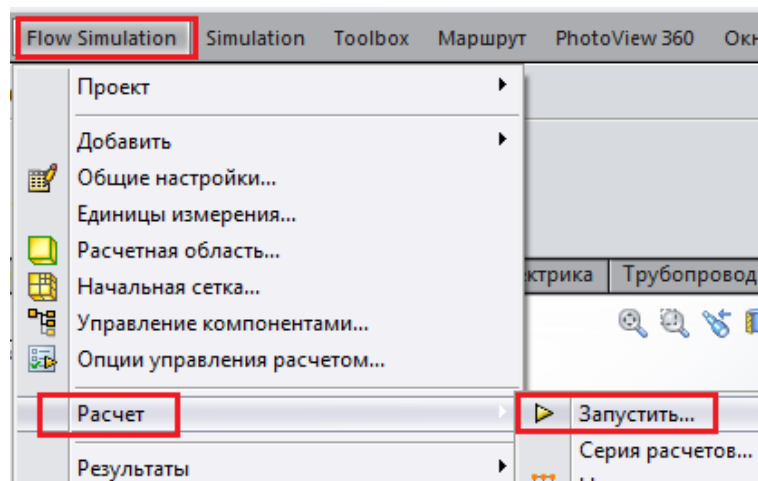


Рисунок 9.13 – Запуск моделі на розрахунок

9. Перегляд цілей.

Для перегляду цілей розрахунку необхідно:

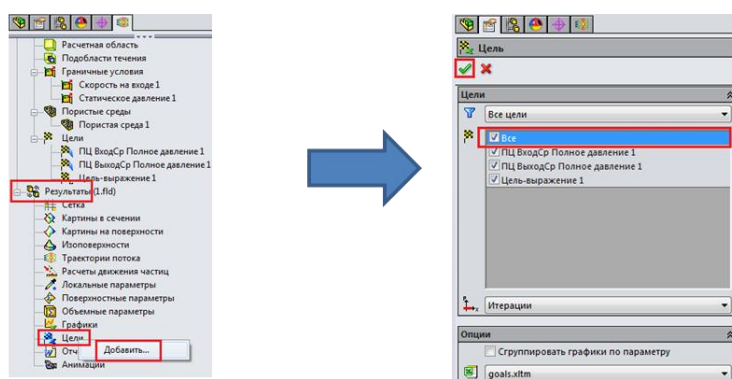
1) Натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

2) В діалоговому вікні «Цели» (Goals) натиснути кнопку «Все» (All).

3) Натиснути ОК .

4) У дереві Flow Simulation Analysis «Дерево анализа» натиснути ПКМ на іконці «Цели» (Goals) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Экспортировать в эксель» (Export to Excel).

5) В папці з результатами розрахунків з'явиться Excel файл з результатами по цілям.



Катализатор.SLDASM [Катализатор [Изотропный]]

Имя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ПЦ ВыходСр Полное давл	[Pa]	101502.98	101503.6161	101502.7191	101505.7919	100	Да	3.072764839	15.48895804
ПЦ ВыходСр Полное дав	[Pa]	101382.73	101382.8579	101382.7277	101383.3355	100	Да	0.607895915	0.618323301
Цель-выражение 1	[Pa]	120.25248	120.7581343	119.9702589	122.4563608	100	Да	2.486101888	14.88614378

Итерации: 55

Интервал анализа: 21

Рисунок 9.14 – Перегляд цілей

Як видно з таблиці, розрахунковий перепад тиску становить 122 Па.


10. Відображення траекторій потоку. Для відображення траекторій потоку необхідно:

1) Натиснути ПКМ на іконці «Траектории потока» (Flow Trajectories) в розділі «Результаты» (Results) і вибрати «Добавить» (Insert).

2) Перейти на вкладку Flow Simulation Analysis «Дерево анализа», потім клацнути по елементу «Скорость на входе 1», щоб виділити внутрішню грань вхідного отвору.

3) Встановити кількість траєкторій в рядку «Количество точек» (Number of Trajectories) рівне 200.

4) У графі «Представление» (Appearance) в рядку «Показать траектории как» (Draw Trajectories As) вибрати «Полоски» (Bands) та в рядку «Раскрасить по параметру» (Color by parameter) вибрати «Скорость» (Velocity).

5) Натиснути ОК . У дереві **Flow Simulation Analysis** «Дерево аналіза» з'явиться новий елемент «Траектории потока 1» (Flow Trajectories 1).

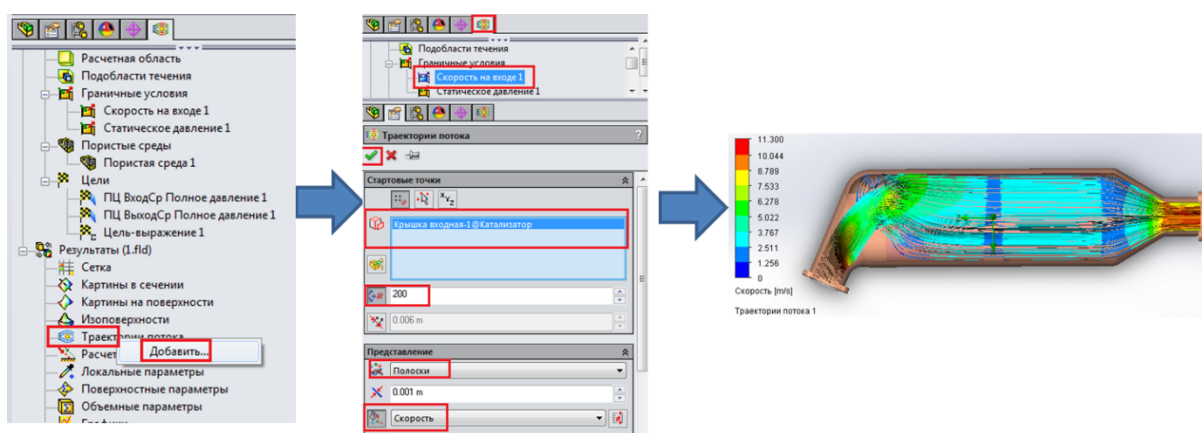


Рисунок 9.15 – Відображення траєкторій потоку

11. Клонування проекту. Для того, щоб клонувати проект необхідно:

1) Натиснути **Flow Simulation** → «Проект» (Project) → «Клонировать проект» (Clone Project).

2) Введіть «Однонаправленный» як ім'я конфігурації (Configuration name).

3) Натиснути ОК . У дереві **Configuration Manager** «Менеджер конфігурацій» з'явиться новий елемент «Однонаправленный 1».

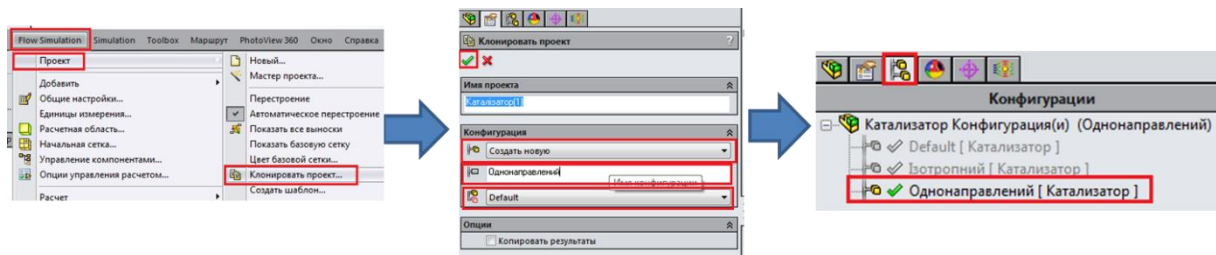


Рисунок 9.16 – Розрахунок параметрів поверхні

12. Створення односпрямованого пористого середовища.

Матеріал, який необхідно створити, вже присутній в інженерній базі даних в графі «Предопределенный» (**Pre-Defined**). Можна пропустити створення пористого середовища, а на етапі його застосування до деталі вибрати в інженерній базі даних попередньо встановлений матеріал «Однонаправленный».

Для цього необхідно:

- 1) Натиснути **Flow Simulation** → «Инструменты» (**Tools**) → «Инженерная база данных» (**Engineering Database**).
- 2) У дереві бази знань вибрати «Порисунктая среда» (**Porous Media**) → «Заданы пользователем» (**User Defined**).
- 3) На вкладці «Элементы» (**Items**) виділити елемент «Изотропный».
- 4) Натисну кнопку «Копировать» (**Copy**).
- 5) Натиснути «Вставить» (**Paste**). У списку з'явиться новий елемент «Копия изотропный (1)».
- 6) Виділити елемент «Копия изотропный (1)» і клікнути по вкладці «Свойства элемента» (**Item Properties**).
- 7) Переіменуваим його на «Однонаправленный».
- 8) Змінити параметр «Тип проницаемости» (**Permeability type**) на «Однонаправленная».
- 9) Зберегти зміни і вийти з бази даних.

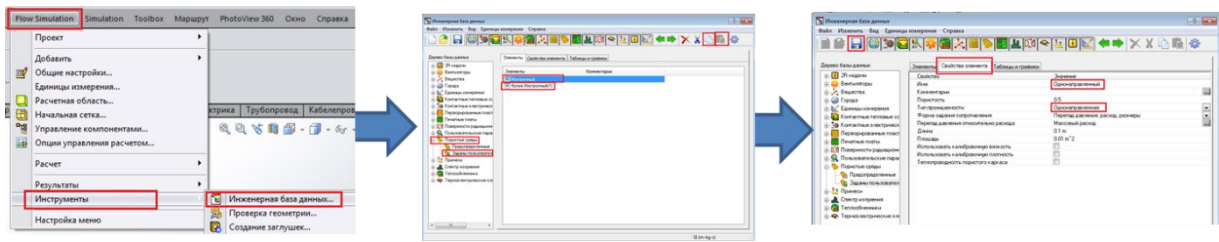


Рисунок 9.17 – Створення односпрямованого пористого середовища

13. Встановлення пористого середовища - Односпрямований тип.

Для односпрямованих пористих матеріалів необхідно вказувати напрямок проникності.

Для цього необхідно:

- 1) Натиснути ПКМ на іконці «Пористая среда 1» вибрати «Изменить» (**Edit Definition**).
- 2) Розкрити розділ «Заданы пользователем» (**User Defined**) і виберіати «Однонаправленный». Якщо було пропущено створення пористого середовища, необхідно викориснувати матеріал «Однонаправленный», який доступний в розділі «Предопределенный» (**Pre-Defined**).
- 3) В графі «Направление» **Direction** вибрати вісь **Z** глобальної системи координат.
- 4) Натиснути ОК.
- 5) Натиснути **Flow Simulation** → «Расчет» (**Solve**) → «Запустить» (**Run**).
- 6) Натиснути кнопку «Запустить» (**Run**).

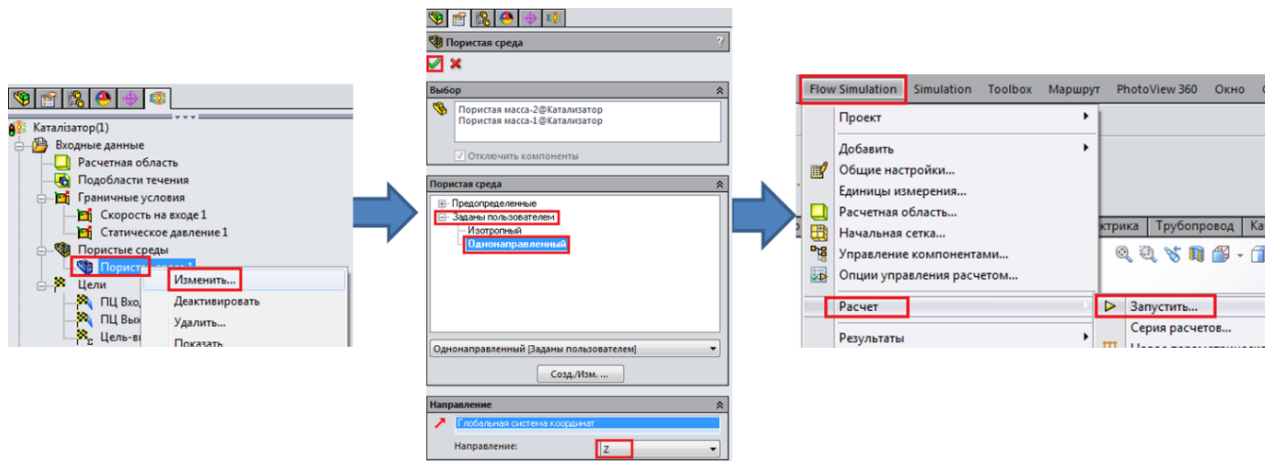


Рисунок 9.18 – Встановлення пористої середовища – Односпрямований тип.

14. Розрахунки та їх результати

В ізотропному проникному середовищі потік займає більший об'єм, що забезпечує велику площу контакту з каталізатором

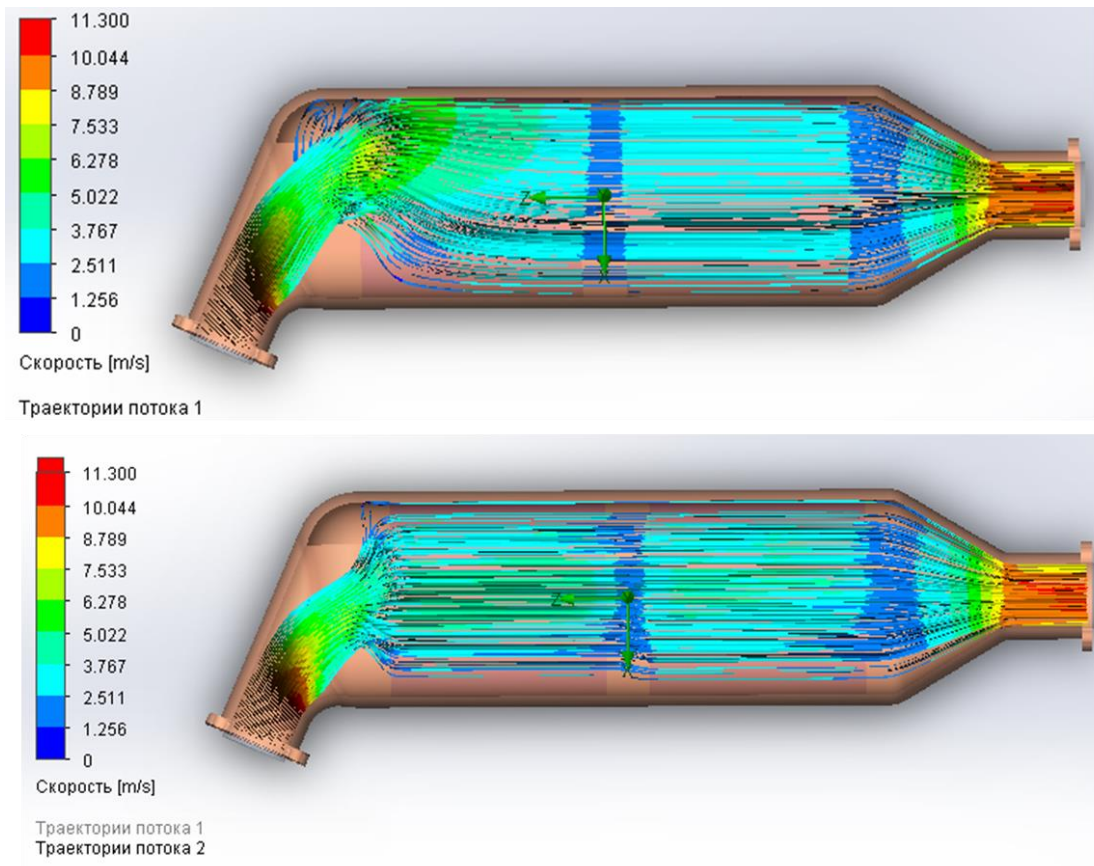


Рисунок 9.19 – Візуалізація результатів розрахунку.

Каталізатор з односпрямованим пористим середовищем забезпечує менший перепад тиску.

Каталізатор.SLDASM [Каталізатор [Ізотропний]]

Імя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ПЦ ВыходСр Полное дав	[Pa]	101502.98	101503.6161	101502.7191	101505.7919	100	Да	3.072764839	15.46895804
ПЦ ВыходСр Полное дав	[Pa]	101382.73	101382.8579	101382.7277	101383.3355	100	Да	0.607895915	0.618323301
Цель-выражение 1	[Pa]	120.25248	120.7581343	119.9702589	122.4563608	100	Да	2.486101888	14.88614378

Итерации: 55
Интервал анализа: 21

Каталізатор.SLDASM [Каталізатор(1) [Однонаправлений]]

Імя цели	Единица измерения	Значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Прогресс сходимости [%]	Использовать в сходимости	Дельта	Критерии
ПЦ ВыходСр Полное дав	[Pa]	101501.544	101502.8952	101501.5442	101505.535	100	Да	3.990731907	47.39454232
ПЦ ВыходСр Полное дав	[Pa]	101382.718	101382.9688	101382.7175	101383.3244	100	Да	0.608848384	0.625893246
Цель-выражение 1	[Pa]	118.628717	119.943887	118.6287174	122.2106004	100	Да	3.383882323	47.35900934

Итерации: 55
Интервал анализа: 21

9.6. Контрольні запитання

1. Що таке пористість матеріалу?
2. Як розраховується пористість?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Verma G, Weber M. SolidWorks Simulation 2017 Black Book // 2017, 479 p.
2. Paul M. Kurowski, Ph.D., P.Eng. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018 // 2018, 597 p.
3. Kurowski P. Thermal analysis with solidworks simulation 2018 and flow simulation 2018 // 2018, 302 p.
4. Matsson J. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2020 // 2020, 350 p.
5. Verma G, Weber M. SolidWorks Flow Simulation 2022 Black Book // 2022, 550 p.

Додаток А. Заходи безпеки під час виконання практичних робіт

Цикл практичних робіт з дисципліни «Параметричне моделювання технологічних процесів» виконуються в комп'ютерному класі кафедри технічних та програмних засобів автоматизації інженерно-хімічного факультету, де розміщені персональні комп'ютери. Обладнання живиться електричним струмом напругою 220 В. Тому при виконанні лабораторних робіт слід дотримуватися заходів безпеки наступних інструкцій.

ІНСТРУКЦІЯ

з техніки безпеки при навчанні студентів на ПЕОМ в учбових лабораторіях кафедри технічних та програмних засобів автоматизації інженерно-хімічного факультету

1. Знання і суворе дотримання цих правил є обов'язковим для всіх осіб, допущених до роботи на ПЕОМ. Доведення їх до кожного зі студентів підтверджується особистим підписом кожного з них у контрольному листі з техніки безпеки. Особи, які не одержали такого інструктажу та не поставили підпис у контрольному листі з техніки безпеки, до роботи на ПЕОМ не допускаються.

2. Всі роботи в учбових лабораторіях кафедри технічних та програмних засобів автоматизації проводяться лише з дозволу викладача або співробітника кафедри.

3. Під час проведення занять в учбовій лабораторії не повинні знаходитися сторонні особи, в тому числі студенти інших груп. Студенти не повинні самовільно залишати учбову лабораторію під час занять.

4. При роботі на ПЕОМ треба пам'ятати, що в них викориснуноктовується напруга, небезпечна для життя.

5. Всі особи, працюючі в учбових лабораторіях кафедри технічних та програмних засобів автоматизації повинні бути ознайомлені з правилами надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом.

6. Перед вмиканням ПЕОМ кожен з працюючих повинен отримати дозвіл викладача або співробітника кафедри.

7. У випадках виникнення короткого замикання, горіння, диму, вогню в апаратурі, пристрій необхідно негайно вимкнути з мережі та доповісти викладачеві або співробітникові кафедри. Самостійні дії по усуненню пошкодження забороняються.

8. У випадку виходу з ладу обладнання або програмного забезпечення, що зумовлені іншими причинами, доповісти викладачеві або співробітникові кафедри. Вимикати апаратуру при цьому не дозволяється. Самостійні дії по усуненню пошкодження забороняються.

9. Працюючі в учбових лабораторіях кафедри технічних та програмних засобів автоматизації несуть майнову та адміністративну відповідальність за збереження та використання обладнання, наданого для їх праці.

10. Категорично забороняється:

- самостійно вмикати та вимикати тумблери на щитку електроживлення;
- не санкціоновано вмикати електрообладнання;
- приносити та вмикати своє обладнання та пристрої, встановлювати власне програмне забезпечення;
- залишати без нагляду увімкнені пристрої та лабораторію;
- пересувати обладнання та комплектуючі;
- підключати та відключати інформаційні кабелі та кабелі живлення;
- використовувати власні носії інформації без дозволу викладачів або співробітників кафедри;
- знаходитись в учбовій лабораторії у верхньому одязі.

11. Після закінчення занять обладнання не вимикається. Робоче місце має бути прибрано працюючим та перевірено викладачем чи співробітником кафедри.

ІНСТРУКЦІЯ

про міри пожежної безпеки у лабораторіях, учбових та робочих приміщеннях кафедри технічних та програмних засобів автоматизації інженерно-хімічного факультету

1. Всі студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила пожежної безпеки в НТУУ «КПІ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО».
2. Завідуючий кафедрою та завідуючий лабораторією відповідають за забезпечення пожежної безпеки всіх приміщень кафедри та за справність протипожежного обладнання та сигналізації.
3. Все електричне обладнання, яке знаходиться в лабораторіях та приміщеннях кафедри, повинно мати заземлення.
4. В усіх приміщеннях повинно дотримуватись чистота, не займати приміщення непотрібними меблями, обладнанням та матеріалами.
5. Всі двері основних та додаткових виходів утримувати у стані швидкого відкривання.
6. Зберігання та використання горючих та легкоспалахуючих рідин у приміщеннях кафедри забороняється.
7. Ремонт електричного обладнання проводити у строгій відповідності з правилами пожежної безпеки.
8. Всі електрозахисти повинні знаходитися у закритому положенні, не займаними сторонніми предметами.
9. Коридори, проходи, тамбури, евакуаційні виходи та підходи до першочергових засобів пожежогасіння, а також комунікаційні ніші повинні бути постійно вільними, чистими та нічим не зайнятими.
10. Відповідальні особи перед закриттям приміщень повинні ретельно оглянути їх, забезпечити прибирання виробничих відходів, перевірити якість перекриття води, газу, відключити напругу електромережі, перевірити стан пожежної сигналізації та засобів пожежогасіння.

11. Від усіх приміщень мати два комплекти ключів. Один комплект здавати черговому, а інший – зберігати в певному місці, яке відомо обслуговуючому персоналу.

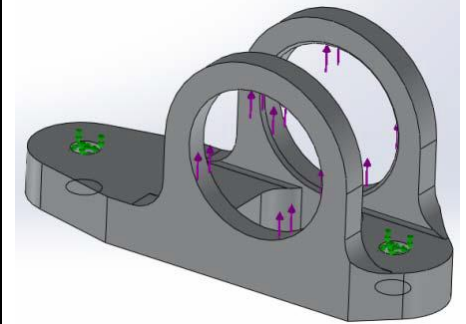
12. Студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила техніки безпеки в НТУУ «КПІ», про що вони ставлять свій підпис у відповідному контрольному листі з техніки безпеки перед початком проведення циклу практичних робіт. Студенти, які не пройшли інструктаж і не поставили підпис у контрольному листі, до роботи не допускаються.

Додаток Б. Індивідуальні завдання до практичної роботи №5

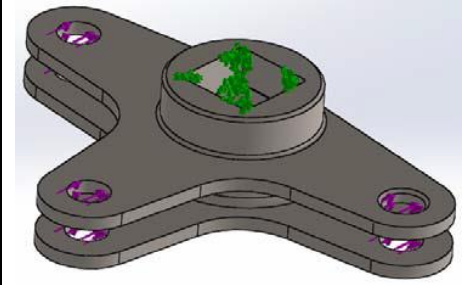
Варіант 1

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Кронштейн		Легована сталь	10000

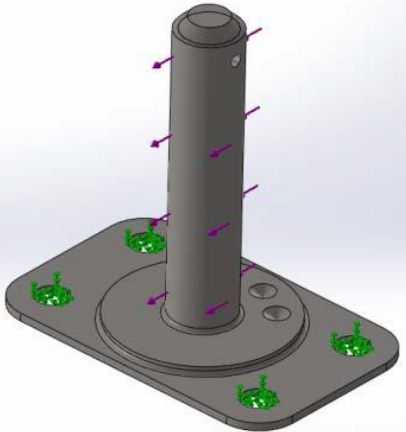
Варіант 2

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Основа		Проста вуглецева сталь	1000

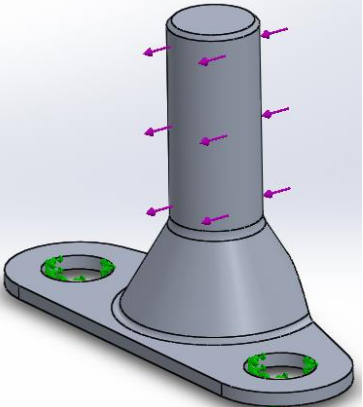
Варіант 3

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Пластина		Легована сталь	5000

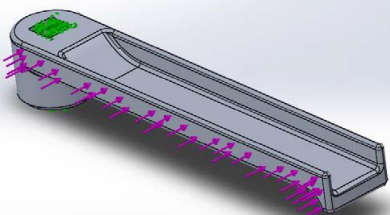
Варіант 4

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Вісь прапорця		Легована сталь	1000

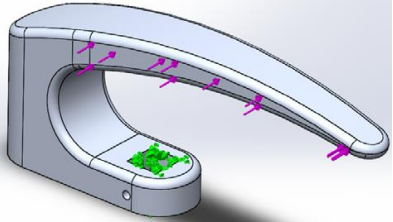
Варіант 5

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ригель		Алюмінієвий сплав 2014	100

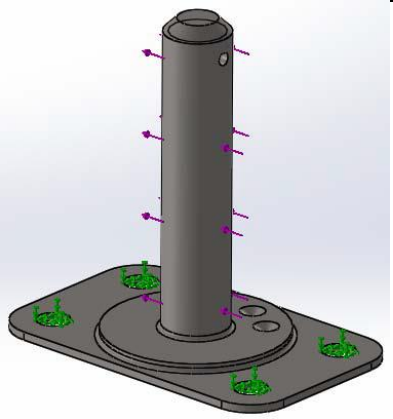
Варіант 6

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Рукоятка		Алюмінієвий сплав 1060-Н18	1000

Варіант 7

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ручка		Алюмінієвий сплав 2014	500

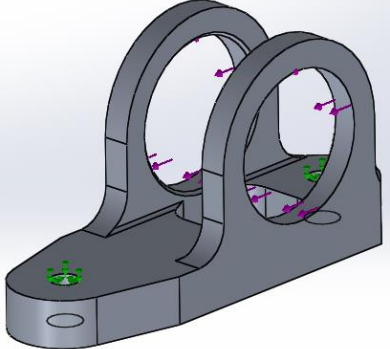
Варіант 8

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Вісь прапорця		Алюмінієвий сплав 1060	100

Варіант 9

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Кронштейн		Алюмінієвий сплав 1060-Н12	500

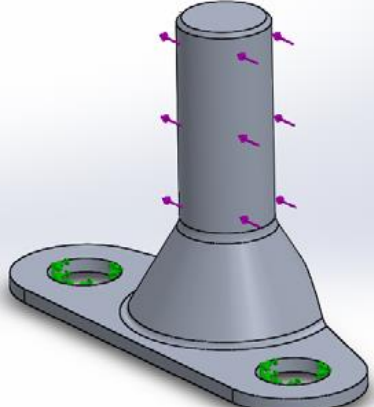
Варіант 10

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Основа		Алюмінієвий сплав 1060-Н18	500

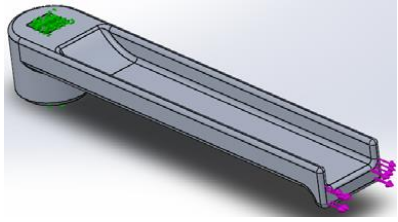
Варіант 11

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Пластина		Алюмінієвий сплав 1060	100

Варіант 12

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ригель		Легована сталь	1000

Варіант 13

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Рукоятка		Алюмінієвий сплав 1060-H18	1000

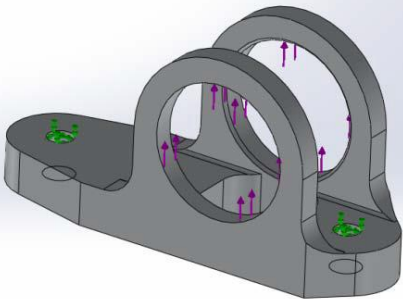
Варіант 14

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ручка		Алюмінієвий сплав 2014	500

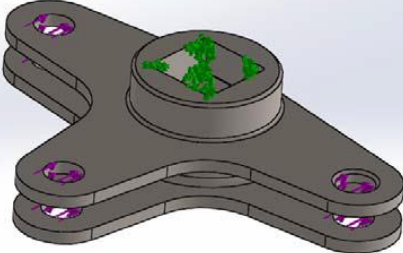
Варіант 15

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Кронштейн		Алюмінієвий сплав 2014	1000

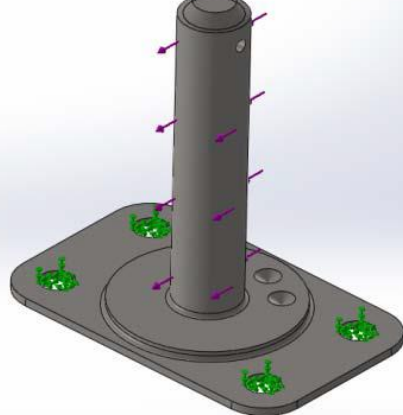
Варіант 16

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Основа		Легована сталь	7000

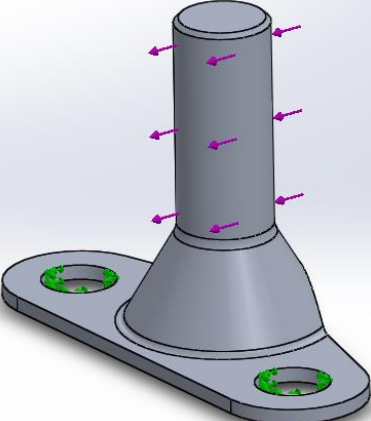
Варіант 17

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Пластина		Легована сталь	5000

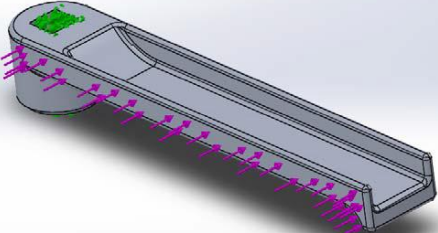
Варіант 18

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Вісь прапорця		Проста вуглецева сталь	3000

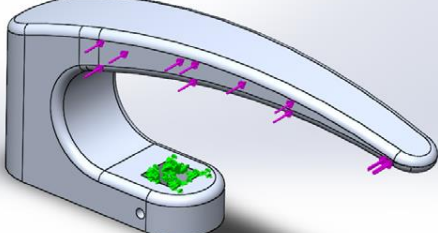
Варіант 19

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ригель		Алюмінієвий сплав 1060-Н18	2000

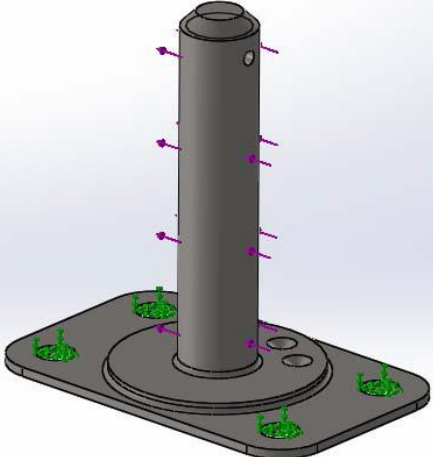
Варіант 20

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Рукоятка		Легована сталь	8000

Варіант 21

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Ручка		Проста вуглецева сталь	7000

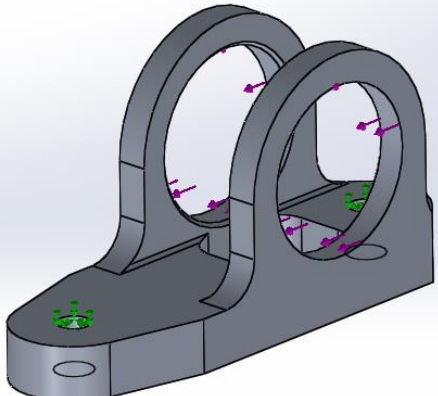
Варіант 22

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Вісь прапорця		Проста вуглецева сталь	10000

Варіант 23

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Кронштейн		Алюмінієвий сплав 1060-Н18	1000

Варіант 24

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Основа		Легована сталь	5000

Варіант 25

Найменування деталі, що досліджується	Схема закріплення та прикладення навантаження	Матеріал	Величина сили, що прикладається, Н
Пластина		Алюмінієвий сплав 1060-H12	500

Додаток В. Індивідуальні завдання до практичної роботи №6

Варіант	Профіль	Число Маха	
		А	В
1	Р-II-10	0,20	0,95
2	ЦАГИ-6-12	0,25	0,90
3	ЦАГИ-790	0,30	0,85
4	ЦАГИ-846	0,35	0,80
5	Як-55	0,40	0,75
6	Мунк-15	0,45	0,70
7	Clark-Y-5.9	0,50	0,65
8	NVA-60	0,55	0,60
9	GA-1	0,55	0,60
10	VA-16	0,50	0,65
11	NVA-123	0,45	0,70
12	MVA-301	0,40	0,75
13	FX60-100	0,35	0,80
14	F-2	0,30	0,85
15	Clark-Y-5.9	0,25	0,90
16	ЦАГИ-846	0,20	0,95
17	VA-16	0,20	0,95
18	Мунк-15	0,25	0,90
19	NVA-123	0,30	0,85
20	Р-II-10	0,35	0,80
21	ЦАГИ-790	0,40	0,75
22	GA-1	0,45	0,70
23	NVA -60	0,50	0,65
24	Як-55	0,55	0,60
25	MVA-301	0,55	0,60

Додаток Г. Індивідуальні завдання до практичної роботи №7

Варіант	Значення тепловиділення для компонентів, Вт			
	Процесори	Конденсатори електролітичні	Транзистори	Трансформатори
1	8	8	3,0	25
2	9	9	3,5	24
3	10	10	4,0	23
4	11	11	4,5	22
5	12	12	5,0	21
6	12	12	5,5	20
7	11	11	6,0	19
8	10	10	6,5	18
9	9	9	7,0	17
10	8	8	7,0	16
11	8	8	6,5	15
12	9	9	6,0	16
13	10	10	5,5	17
14	11	11	5,0	18
15	12	12	4,5	19
16	12	12	4,0	20
17	11	11	3,5	21
18	10	10	3,0	22
19	9	9	3,0	23
20	8	8	3,5	24
21	8	8	4,0	25
22	9	9	4,5	25
23	10	10	5,0	24
24	11	11	5,5	23
25	12	12	6,0	22

Додаток Д. Індивідуальні завдання до практичної роботи №8

Варіант №	Температура, °С		Швидкість гарячого повітря, м/с	Витрати води, кг/с
	Холодної води	Гарячого повітря		
1	5	360	6	0,05
2	10	370	7	0,06
3	15	380	8	0,07
4	20	390	9	0,08
5	25	400	10	0,09
6	5	410	11	0,10
7	10	420	12	0,11
8	15	420	6	0,11
9	20	410	7	0,10
10	25	400	8	0,09
11	30	390	9	0,08
12	35	380	10	0,07
13	5	370	11	0,06
14	10	360	12	0,05
15	15	400	6	0,08
16	20	400	7	0,09
17	25	390	8	0,10
18	30	380	9	0,11
19	35	370	10	0,11
20	35	360	11	0,10
21	30	360	12	0,09
22	25	370	12	0,08
23	20	380	11	0,07
24	15	390	10	0,06
25	10	400	9	0,05

Додаток Е. Індивідуальні завдання до практичної роботи №9

Варіант №	Швидкість газів на вході в каталізатор, м/с	Порисунктість робочого тіла
1	3	0,20
2	4	0,25
3	5	0,30
4	6	0,35
5	7	0,40
6	8	0,45
7	9	0,50
8	10	0,55
9	11	0,60
10	12	0,65
11	13	0,70
12	14	0,75
13	15	0,80
14	16	0,85
15	17	0,90
16	17	0,20
17	16	0,25
18	15	0,30
19	14	0,35
20	13	0,40
21	12	0,45
22	11	0,50
23	10	0,60
24	9	0,65
25	8	0,70