

1. Аналіз та опис конструкції прототипів дозвукових аеродинамічних труб та виявлення відмінностей

1.1 Вступ

Дослідження силового взаємодії потоку і літального апарату (ЛА) представляє єдину одну з важливих задач аеродинаміки, котра вирішується за допомогою експерименту в аеродинамічних трубах. При цьому у більшості використовується принцип зворотнього руху, коли модель ЛА закріплюється в трубі, а газовий потік набігає на неї з заданою швидкістю. Даний принцип, відповідно до загальних принципів відношення класичної механіки, застосовується у випадку рівномірного прямолінійного поступального руху. В основному всі труби, які використовуються в нашому часі можна розділити за конструктивними ознаками на труби замкнутого і незамкнутого типу. У трубі першого типу безперервно циркулює одна і та маса газу. У незамкнених трубах газ, потрапивши в робочу частину через сопло, потім викидається з труби. Витрата енергії в такій трубі вище, ніж в замкнутій установці, де необхідно лише підтримувати рух циркулюючого газу, проте вартість незамкненою труби виявляється менше. Залежно від швидкості потоку в робочій частині аеродинамічні труби можна поділити на дозвукові ($0,8 < M < 1,2$), околожвукові ($0,8 < M < 1,2$), надзвукові ($1,2 < M < 5$) і гіперзвукові ($M > 5$). Дозвукові труби додатково ділять на труби малих ($0 < M < 0,2$) і великих ($0,2 < M < 0,8$) дозвукових швидкостей. Перші три види труб можуть бути виконані як по замкнутій, так і незамкненою схемами. Гіперзвукові труби будуються зазвичай незамкнутими і з обов'язковим підігрівом робочого газу. По виду робочої частини аеродинамічні труби поділяють на труби з відкритою робочою частиною, закритою робочою частиною і труби з герметичною камерою. Залежно від тривалості роботи труби бувають короткочасного і постійного дії. Труба короткочасної дії дозволяє відчувати моделі лише протягом малого проміжку часу (кілька хвилин). Живлення

такої труби здійснюється від батареї балонів високого тиску, куди повітря попередньо накачується компресорами. Ємність балонної батареї визначає тривалість роботи аеродинамічної труби. У трубах постійного дії потік газу створюється за допомогою осьового компресора, вбудованого в аеродинамічну трубу і забезпечує необхідний ступінь стиснення газу для досягнення заданих чисел M . Час дії такої труби практично не обмежена і визначається умовами експерименту.

1.2 Класифікація аеродинамічних труб дозвукових швидкостей

Як правило, аеродинамічні труби малих швидкостей є установками постійного дії, в якій штучний потік газу може підтримуватися протягом тривалого часу. Це створює великі зручності для проведення експерименту. Конструкція аеродинамічних труб відрізняється великою різноманітністю і залежить від призначення труб і від можливостей їх проектантів. Деякі елементи можуть бути присутніми у одних, і відсутні у інших труб. Класифікувати аеродинамічні труби малих швидкостей можна за багатьма ознаками. Нижче пропонуються деякі з них.

1.3 Класифікація по типу робочої частини

Досліджувана модель поміщається в робочій частині. Робоча частина може мати або не мати стінок. У першому випадку її називають закритою, у другому - відкритою. Можливий і такий варіант відкрита робоча частина, оточена герметичною камерою, званої камерою Ейфеля. Бувають закриті робочі частини зі щілинами.

1.4 Замкнений та незамкнений контур

Потік повітря в аеродинамічній трубі може переміщатися по замкнутому контуру, не виходячи за межі установки. Альтернативою є труба з незамкнутим контуром. У такій трубі повітря забирається з приміщення і, пройшовши через аеродинамічну трубу, викидається знову в приміщення. Поперечний розмір приміщення повинен бути досить великим у порівнянні з

поперечних розміром аеродинамічної труби, щоб швидкості повітря поза труби були малими. Можна також забирати і викидати повітря поза будівлею з атмосфери, проте в цьому випадку характеристики потоку в установці будуть залежати від наявності вітру.

У трубах із замкнутим контуром для замикання контуру використовуються зворотні канали, що з'єднують вхідні і вихідні пристрої. Більшість установок має єдиний зворотний канал, але є конструкції з двома зворотними каналами. Бувають зворотні канали з поперечним перерізом у вигляді кільця. Такий канал охоплює інші частини аеродинамічної труби, забезпечуючи ефективне використання простору приміщення. Недоліком труб з незамкнутим контуром є великі втрати потужності, так як на виході втрачається вся кінетична енергія повітряного потоку. Тому великі аеродинамічні труби, як правило, є установками із замкнутим контуром. Труби з відкритою робочою частиною мають замкнутий контур або камеру Ейфеля. Присутність камери Ейфеля навколо робочої частини дозволяє створювати установки з незамкнутим контуром. Широке поширення отримали труби малих швидкостей двох типів. У Геттінгенському університеті в 1916-1917 р Л. Прандтль створив трубу з відкритою робочою частиною і замкнутим контуром рис 2. Труби такого типу часто називають Геттінгенського трубами. Другий тип пов'язаний з ім'ям Г. Ейфеля, який побудував аеродинамічну трубу з незамкнутим контуром і камерою Ейфеля, навколишнього робочу частину. Схема труби Г. Ейфеля представлена на рис. 1. Тиск в камері Ейфеля нижче атмосферного.

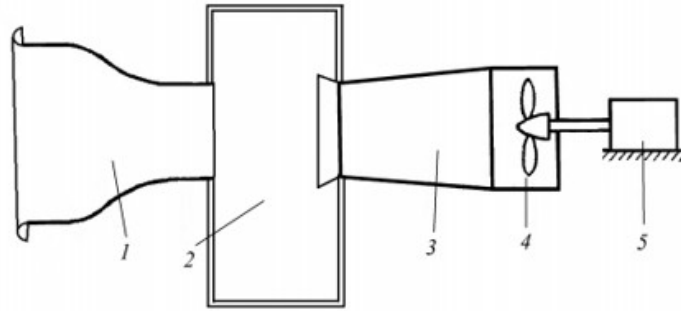


Рис 1.2. Схема аеродинамічної труби з незамкненим контуром та камерою Ейфеля. 1-сопло, 2-камера Ейфеля, 3- дифузор, 4- вентилятор, 5- електродвигун

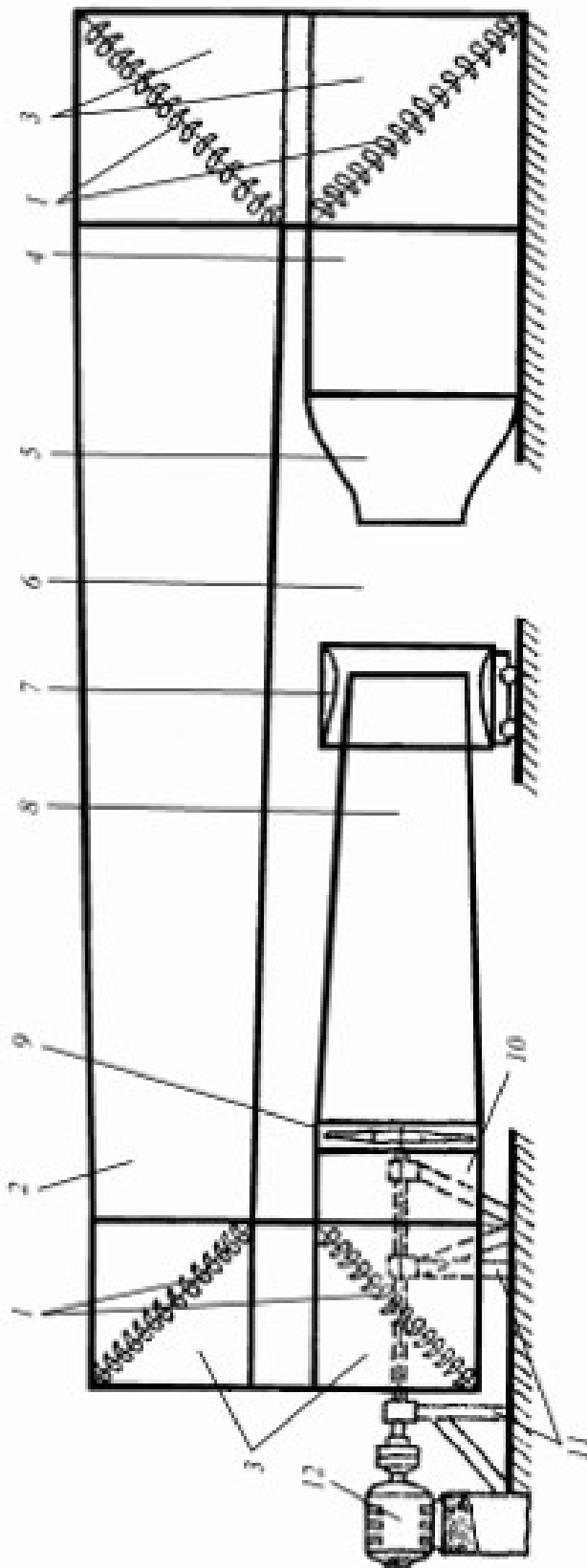


Рис 1.1 Схема аеродинамічної труби з замкненим контуром і відкритою робочою частиною. 1- поворотні Лопакти, 2 – оборотний канал, 3 – поворотні коліна, 4 – форкамера, 5 – сопло, 6 – робоча частина, 7 – кільцевий розтруб, 8 – дифузор, 9 – вентилятор, 10 – перехідна ділянка, 11 – опори вентиляторної групи, 12 - електродвигун

1.5 Пристрій і призначення частин аеродинамічних труб

1.5.1 Робоча частина

Досліджувана модель розташовується в робочій частині. Як правило, робоча частина є найвужчим місцем аеродинамічної труби, в якому швидкість потоку приймає максимальне значення. Розглянемо переваги і недоліки відкритої і закритої робочих частин. Важливим параметром є нагромадженість робочої частини моделлю. Зазвичай нагромадженість характеризується відношенням характерної площі досліджуваної моделі до поперечного розміру робочої частини. Чим вище нагромадженість, тим більше вплив меж потоку на результати експерименту. У відкритій робочої частини цей вплив менше, ніж в закритій робочій частині. Тому в відкритих робочих частинах можна досліджувати більші моделі.

Вибирати тип робочої частини слід, виходячи з призначення аеродинамічної труби. Якщо труба призначена для промислових випробувань, то найбільш важливим є можливість хорошого доступу до робочої частини. Хороший доступ дозволяє швидко проводити встановлення моделі, полегшує проведення вимірювань. В цьому випадку слід вибрати відкриту робочу частину. Але за зручність доведеться заплатити, роблячи спеціальні заходи для подавлення пульсацій, що виникають в повітряному потоку в робочій частині. Ступінь турбулентності у відкритій робочої частини неможливо отримати менше кількох десятих часток відсотка. Якщо важливо, щоб потік мав малу турбулентність, необхідно вибрати закриту робочу частину. Довжина відкритої робочої частини зазвичай не перевищує 1,5 - 2 поперечних розмірів. У трубах з відкритою робочою частиною не можна моделювати зростання прикордонного шару на великій відстані. Закриті

робочі частини дозволяють це робити. У трубах із закритою робочою частиною потрібно вживати спеціальні заходи для того, щоб статичний тиск не змінювалося уздовж робочої частини. Наявність тертя на стінках і поверхні моделі веде до втрат повного тиску в потоці. Щоб ці втрати не позначалися на зміні статичного тиску, необхідно збільшувати площу поперечного перерізу робочої частини вниз по потоку. Взагалі кажучи, для різних моделей збільшення площі поперечного перерізу повинен бути різним. Для робочої частини без моделі або з моделлю малих розмірів розширення поперечного перерізу вибирають рівним товщині витіснення примежевого шару. Для розрахунку цієї величини використовується логарифмічний профіль швидкостей на гладкій пластині в повністю турбулентному примежевому шарі.

Таблиця 1

Порівняння відкритої та закритої робочої частини

	Переваги	Недоліки
Відкрита робоча частина	<ol style="list-style-type: none"> 1. Хороший доступ. 2. Постійність статичного тиску. 3. Нема впливу стінок на потік. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пульсація потоку. 2. Необхіден замкнутий контур або камера Ейфеля. 3. Втрата потужності 4. Мала довжина.
Закрита робоча частина	<ol style="list-style-type: none"> 1. Відсутність пульсацій. 2. Є можливість використовувати незамкнений контур. 3. Менші втрати 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Утруднений доступ. 2. Необхідно вирівнювати статичний тиск. 3. Стінки впливають на обтікання моделі.

	потужності. 4. Необмежена довжина.	
--	---------------------------------------	--

Певну вигоду можна отримати, використовуючи закриту робочу частину зі щілинами. Закрита робоча частина із щілинами дозволяє отримати постійний тиск по довжині робочої частини, характерне для відкритої робочої частини, заощадити на потужності і уникнути пульсацій. Через щілини можна також ввести вимірювальні прилади в робочу частину. Щілини призводять також до зменшення впливу нагромадженості на результати експерименту. Форма поперечного перерізу робочої частини залежить від виду моделей, які передбачається дослідити. Наприклад, аеродинамічні труби, призначені для випробувань моделей літаків, часто мають еліптичну розтин. У цей перетин добре вписується проекція літака. Крила розташовуються уздовж великої півосі еліпса.

1.5.2. Сопло

Уже в перших аеродинамічних трубах стало ясным, що для отримання однорідного повітряного потоку необхідно застосовувати спеціальні пристрої. Основним пристроєм для отримання рівномірного потоку є сопло. Сопло розташовується перед робочою частиною і являє собою (для дозвукових аеродинамічних труб) звужуючий канал. Крім створення однорідного потоку у сопла є ще одна функція. Сопло служить переходом від найширшої частини труби з малими швидкостями до самої вузької частини з високою швидкістю. Часто в якості прикладу теоретичної формули для контуру сопла призводять формулу Вітошинського, отриману з використанням моделі ідеальної рідини для сопла, що має форму поперечного перерізу у вигляді кола. Однак, на практиці ця формулу не завжди можна використовувати. Вихідна і вхідна частина сопла часто мають різну форму поперечного перерізу.

1.5.3 Форкамера

Перед соплом вище по потоку розташовується форкамера, як правило, найширша частина контуру аеродинамічної труби. Форкамера служить для вирівнювання і заспокоєння потоку. Якщо в таких старих трубах, як АТ-12 (рік народження 1933) форкамери мали малу довжину, то в більш нових трубах для кращого вирівнювання потоку влаштовуються форкамери збільшеної довжини. У форкамері для вирівнювання потоку встановлюються хонейкомб і (або) детурбулізуючі сітки. Слово хонейкомб прийшло в українську мову з англійської. Дослівний переклад слова honeycomb бджолині стільники. У вигляді сот хонейкомб являє собою грати з осередками довжиною 5 - 6 поперечних комірок. Форма комірок в проекції на поперечний переріз форкамери може мати різну форму. Часто зустрічаються квадратні комірки. Товщина стінок повинна бути настільки малою, наскільки дозволяє матеріал, з якого хонейкомб виготовлений. Зустрічаються хонейкомби з дерева, але найпоширенішим матеріалом є сталь. Хонейкомб розбиває великі вихори і вирівнює потік у напрямку. Хонейкомб також зменшує нерівномірність поздовжньої компоненти швидкості потоку. У той же час хонейкомб служить джерелом збурень в потоці через формування слідів за стінками комірок. Тому в трубах з низьким ступенем турбулентності в робочій частині хонейкомби не встановлюються.

1.5.4 Дифузор

Дифузором називається розширюючий канал, який розташовується після робочої частини. Взагалі кажучи, в контурі аеродинамічної труби може бути кілька послідовно розширюючих каналів. Ці канали в трубах із замкнутим контуром забезпечують плавний перехід до форкамери, в якій площа поперечного перерізу максимальна. Основне призначення дифузора поступове зниження швидкості і відновлення тиску в контурі

1.5.5 Вентилятор

Вентилятор може розташовуватися відразу після дифузора або після двох поворотних колін на початку зворотнього каналу. Можуть використовуватися осьові або відцентрові вентилятори. На великих установках зазвичай застосовуються осьові вентилятори. Перед обертовим колесом вентилятора може бути встановлений направляючий апарат, а за ним спрямляючий апарат, що дозволяє усунути закрученність потоку. Ці пристрої дозволяють підвищити також коефіцієнт корисної дії вентилятора. У великих трубах зовнішній радіус колеса вентилятора може досягати декількох метрів. Частота обертання вентиляторів повинна бути обмежена так щоб окружна швидкість кінців лопатей не наближалася до швидкості звуку. Максимальна лінійна швидкість вибирається не більш 180-200 м/с . Перевищення швидкості веде до падіння ККД вентилятора і до зростання шуму. Швидкість потоку в більшості установок регулюється зміною частоти обертання вентилятора. Зміна швидкості обертання виробляється або зміною напруги, що подається на двигун постійного струму, що обертає вентилятор, або зміною частоти електричного струму, що подається на двигун змінного струму. Рідше для управління швидкістю використовується поворот лопатей вентилятора. Можливо також використання байпаса каналу, що з'єднує ділянки до і після вентилятора. Повітря перетікає з цього каналу і зменшує перепад тиску на вентиляторі. Канал забезпечується регулюючою заслонкою. Існують установки з двома і більше вентиляторами, встановленими поруч. Два поруч стоять вентилятора вдало поєднуються з соплами, що мають в поперечному перерізі еліптичну форму.

1.5.6 Зворотній канал

Зворотній канал в контурі замкнутої аеродинамічної труби являє собою дифузор, що забезпечує перехід до форкамері. До нього пред'являються вимоги, викладені вище в розділі про дифузор. У трубах з незамкнутим

контуром роль зворотнього каналу виконує приміщення, в якому знаходиться установка. Як правило, поперечний переріз приміщення значно перевершує за площею поперечний переріз труби, швидкості потоку в приміщенні малі. Втратами на тертя можна знехтувати. Основні втрати пов'язані з переходом від вентилятора до приміщення, це втрати через раптове розширення або втрати на вихлоп. У цьому випадку між вентилятором і приміщенням поміщається вихідний пристрій представляє собою дифузор. Перед форкамерою розташовується вхідна ділянка, що забезпечує з найменшими втратами вхід повітря в форкамеру. Зворотні канали мають великі габарити. Вони можуть розташовуватися над робочою частиною, під робочою частиною або розташовуватися збоку, Ряд аеродинамічних труб мають два зворотних канала, один зверху, інший знизу. Ефективно використовувати простір допомагають кільцеві зворотні канали. При цьому робоча частина, сопла, дифузор і вентилятор знаходяться в центрі кільця. Доступ до робочої частини досягається через проходи, прорізані в кільцевому зворотному каналі. Трубою, побудованої за цією схемою, є аеродинамічна труба змінної щільності. Вся установка укладена в посудину циліндричної форми з двома напівсферичними кришками. Посудина такої форми здатна витримувати високий тиск. Зміною тиску в посудині регулюється щільність повітря, яка лінійно входить у вираз для числа Рейнольдса Re .

1.5.7 Поворотні коліна

В аеродинамічних замкнутих контурах невід'ємною частиною є поворотні коліна. Опір поворотних колін і рівномірність потоку після колін залежать від ставлення радіуса закруглення коліна до поперечного розміру. Чим більше радіус закруглення, тим менше опір коліна. Однак прагнення зменшити габарити аеродинамічної труби і тим заощадити місце в приміщенні і знизити витрати на виготовлення змушує використовувати коліна дуже малого радіуса закруглення. Поліпшити рівномірність потоку і

знизити опір дозволяє застосування поворотних лопаток в колінах з малим радіусом закруглення. Є і інші різні по ефективності прийоми зниження опору. Наприклад збільшення радіусу закруглення зовнішньої стінки коліна менш ефективно, ніж збільшення радіусу закруглення внутрішньої стінки. Поворотні лопатки часто виготовляються профільованими. Можливо їх розташування на рівних відстанях один від одного або частіше у внутрішньої стінки, рідше у зовнішній.

1.5.8 Камера Ейфеля

Камерою Ейфеля називається герметична камера, в якій під час роботи аеродинамічної труби встановлюється тиск, відмінний від атмосферного. Використання камери Ейфеля дозволяє використовувати відкриту робочу частину з трубами без зворотнього каналу. Камера Ейфеля може бути досить великою, щоб там містилося обладнання та вимірювальні прилади.

1.5.9 Вхідні та вихідні ділянки труб з незамненим контуром

Вхідні і вихідні ділянки мають конструкцію, котра мінімізує втрати на вхід і на вихлоп. Форма вхідних і вихідних пристроїв залежить від того, чи є стінка перед входом або виходом.

1.5.10 Інші пристрої

У контурі аеродинамічних труб можуть бути присутніми перехідні ділянки, що з'єднують елементи з різною формою поперечного перерізу. Наприклад, труба котра оточує вентилятор, має круглий перетин, далі канал, виконаний з перетином у формі квадрата або восьмикутника. Між ними розташовується перехідна ділянка, яка плавно їх з'єднує. У контур труби можуть включатися різного типу теплообмінники, охолоджуючі, або нагріваючі повітря.

1.6 Вибір конструктивно-силової схеми сопла

Після детального аналізу існуючих конструктивно-силових схем сопла, з конструктивних міркувань, була вибране сопло лонжероного типу з шпангоутами.

Оскільки аеродинамічна труба є дозвуковою і проектується для не значних навантажень, то був обраний матеріал – дерево.

Даний матеріал є легким та зручним у виробництві і цілком підходить для цілей аеродинамічної дозвукової труби.

Висновок до першого розділу

В першому розділі було проведено детальний аналіз існуючих типів дозвукових аеродинамічних труб та було виявлено основні відмінності.

Дозвукові аеродинамічні труби класифікують по типу робочої частини. Робоча частина може мати або не мати стінок. У першому випадку її називають закритою, у другому - відкритою.

Другою відмінністю є тип контуру, він може бути як замкнутий, так і не замкнутий.

У трубі не замкненого контуру повітря забирається з приміщення і, пройшовши через аеродинамічну трубу, викидається знову в приміщення.

У трубах із замкнутим контуром для замикання контуру використовуються зворотні канали, що з'єднують вхідні і вихідні пристрої.

2. Розрахунок геометричних параметрів сопла з контуром Вітошинського

Відомо, що форма і певні геометричні параметри контуру каналу найістотнішим чином впливають на параметри потоку в ньому. Так в ряді робіт показано, що тільки перерозподіл кривизни по довжині контура, наприклад, лопатки турбіни може привести до зниження втрат в турбінній решітці до декількох відсотків.

У роботах, пов'язаних з дослідженням течій, як правило, приводиться форма каналу, вихідні дані для розрахунку потоку, результати теоретичного розрахунку параметрів потоку, експериментальні дані, порівняння теоретичних і експериментальних даних, аналіз отриманих результатів, висновки. І практично в подібних роботах відсутній етап - дослідження геометричних параметрів контуру каналу. Відсутність вказаного етапу можна пояснити, складністю і трудомісткістю подібних досліджень., Якщо врахувати, що форма контура лопатки турбіни, зокрема, задається в багатьох випадках матрицею прямокутних координат.

Важливість такого дослідження пов'язана з тим, що на підставі аналізу геометричних характеристик контура можна передбачити поведінку потоку в каналі, виділити характерні точки або області течії і т.д. Проектант, наприклад, після такого дослідження може при необхідності перепроєктувати канал; а експериментатор - побудує систему вимірювань з урахуванням виявлених особливостей і т.п.

Вхідні дані для подальшого розрахунку геометричних параметрів:

Годинна витрата повітря: 27900 (м³ / год);

Секундний витрата повітря: 7,75 (м³ / с);

Робоча швидкість потоку: 20 (м / с);

Площа робочої частини (РЧ): 0,39 (м²);

Менший радіус сопла (r): 0,27 (м);

Відношення радіусів сопла: 1,74 (м);

Більший радіус сопла (R): 0,46 (м)

2.1 Розрахунок координатів січення робочої частини АТД

Розрахуємо координати січення робочої частини АТД по осі Y за формулою 2.1:

$$Y = r \sqrt{\frac{1 - z^2}{R^2}} \quad (2.1)$$

Результати розрахунків занесенні у таблицю 2, 3, 4:

Таблиця 2

Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y
0	270	200	243	400	133	400	-133
40	269	240	230	440	79	360	-168
80	266	280	214	455	40	320	-194
120	261	320	194	460	0	280	214
160	253	360	168	455	-40	200	-230

Таблиця 3

Z	Y	Z	Y	Z	Y	Z	Y
---	---	---	---	---	---	---	---

160	-253	0	-270	-280	-214	-455	40
120	-261	-120	-261	-320	-194	-440	79
80	-266	-160	-253	-400	-79	-400	133
40	-269	-200	-243	-455	-40	-360	168
0	-270	-240	-230	-460	0	-320	194

Таблиця 4

Z	Y	Z	Y
-280	214	-120	261
-240	230	-80	266
-200	243	-40	269
-160	253	0	270

За допомогою координат було отримано січення робочої частини АТД (рис 2.1):

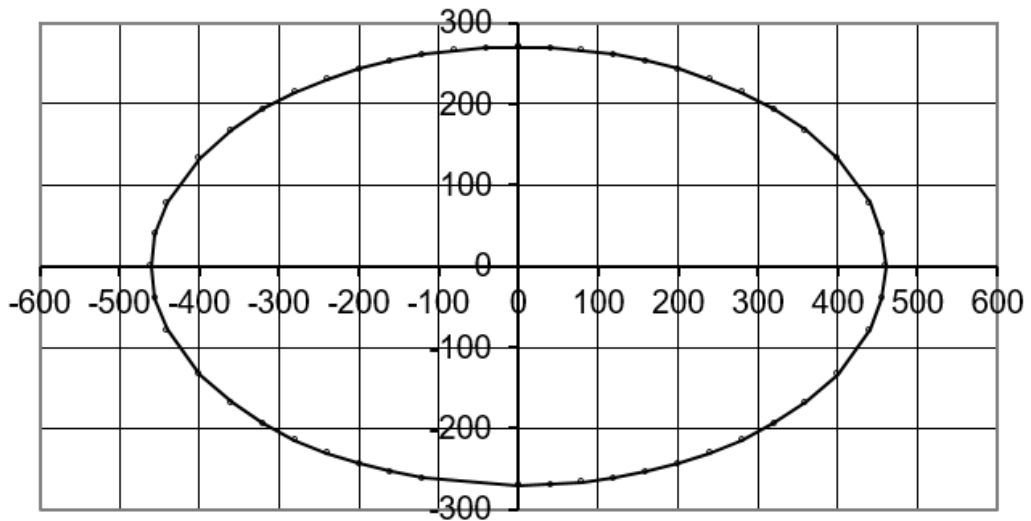


Рисунок 2.1 Січення робочої частини АДТ

2.2 Розрахунок радіусу робочої частини АДТ для різних кутів нахилу продольного січення

Обчислимо радіус робочої частини для різних кутів нахилу за формулою 2.2:

$$R_1 = \frac{R \cdot r}{\sqrt{R^2 \cdot (\cos \theta)^2 + r^2 \cdot (\sin \theta)^2}} \quad (2.2)$$

Результати обчислень для кутів від 0° до 360° заносимо в таблицю 5:

Таблиця 5

θ	R_1	θ	R_1	θ	R_1
0	270	60	379	120	379
10	273	70	416	130	344
20	281	80	447	140	316
30	295	90	460	150	295

40	316	100	447	160	281
50	344	110	416	170	273

Таблиця 6

Θ	R_1	Θ	R_1	Θ	R_1
180	270	250	416	320	316
190	273	260	447	330	295
200	281	270	460	340	281
210	295	280	447	350	273
220	316	290	416	360	270
230	344	300	379		
240	379	310	344		

2.3 Розрахунок профіля сопла для різних кутів нахилу поздовжнього перерізу

Контур канала розраховуємо за формулою Вітошинського (2.3):

$$Y_0(x) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{R_0}{R_1} \right)^2 - 1 \right] \cdot \frac{\left[1 - 3 \left(\frac{X}{L} \right)^2 \right]^2}{\left[1 + \left(\frac{X}{L} \right)^2 \right]^3}}} \quad (2.3)$$

де R_0 - радіус вихідного перерізу;

R_1 - радіус вихідного перерізу

$Y(x)$ - рівняння контура;

L – параметр кривої Вітошинського, зв'язаний з довжиною криволінійної ділянки відношенням $L = \sqrt{5} \cdot l$ (l – довжина робочої частини каналу)

Параметри $Z(x)$ та $Y(x)$ розраховуються за формулами 2.4, 2.5:

$$Z(x) = Y_0 \cdot \sin \theta \quad (2.4)$$

$$Y(x) = Y_0 \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

де Y_0 – параметр, котрий розраховується за формулою Вітошинського (2.3)

θ - кут нахилу повздовжнього перерізу.

Розрахунки для кутів $0^\circ - 90^\circ$ занесені у таблиці

$\theta = 0^\circ$						
	l	R1	R0	L	Y	
Таблиця 7	1000	270	930	1732	0	930
	1000	270	930	1732	10	928
	1000	270	930	1732	30	917
	1000	270	930	1732	50	894
	1000	270	930	1732	100	809
	1000	270	930	1732	150	710
	1000	270	930	1732	200	621
Таблиця 8	1000	270	930	1732	250	547
	1000	270	930	1732	300	488
	1000	270	930	1732	350	441
	1000	270	930	1732	400	404
	1000	270	930	1732	450	374
	1000	270	930	1732	500	350
	1000	270	930	1732	550	331
	1000	270	930	1732	600	315

$\Theta = 10^\circ$							10
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	273	930	1732	0	930	162	916
1000	273	930	1732	10	929	161	914
1000	273	930	1732	30	917	159	903
1000	273	930	1732	50	895	155	882
1000	273	930	1732	100	811	141	799
1000	273	930	1732	150	714	124	703
1000	273	930	1732	200	625	109	616
1000	273	930	1732	250	552	96	543
1000	273	930	1732	300	492	86	485
1000	273	930	1732	350	445	77	438
1000	273	930	1732	400	408	71	402
1000	273	930	1732	450	378	66	372
1000	273	930	1732	500	354	61	348
1000	273	930	1732	550	334	58	329
1000	273	930	1732	600	319	55	314
1000	273	930	1732	650	306	53	302
1000	273	930	1732	700	296	51	292
1000	273	930	1732	750	288	50	284
1000	273	930	1732	800	283	49	278
1000	273	930	1732	850	278	48	274
1000	273	930	1732	900	275	48	271
1000	273	930	1732	950	274	48	269
1000	273	930	1732	1000	273	47	269

Таблица 8

$\Theta = 20^\circ$							20
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	281	930	1732	0	930	318	874
1000	281	930	1732	10	929	318	873
1000	281	930	1732	30	918	314	862
1000	281	930	1732	50	897	307	843
1000	281	930	1732	100	817	280	768
1000	281	930	1732	150	723	247	680
1000	281	930	1732	200	636	218	598
1000	281	930	1732	250	563	193	529
1000	281	930	1732	300	504	172	473
1000	281	930	1732	350	456	156	429
1000	281	930	1732	400	418	143	393
1000	281	930	1732	450	388	133	364
1000	281	930	1732	500	363	124	341
1000	281	930	1732	550	344	118	323
1000	281	930	1732	600	328	112	308

Таблица 9

$\Theta = 30^\circ$							30
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	295	930	1732	0	930	465	805
1000	295	930	1732	10	929	464	804
1000	295	930	1732	30	919	460	796
1000	295	930	1732	50	900	450	780

1000	295	930	1732	100	827	414	716
1000	295	930	1732	150	738	369	639
1000	295	930	1732	200	654	327	566
1000	295	930	1732	250	582	291	504
1000	295	930	1732	300	523	261	453
1000	295	930	1732	350	475	237	411
1000	295	930	1732	400	436	218	378
1000	295	930	1732	450	405	203	351
1000	295	930	1732	500	380	190	329
1000	295	930	1732	550	360	180	312
1000	295	930	1732	600	343	172	297
1000	295	930	1732	650	330	165	286
1000	295	930	1732	700	320	160	277
1000	295	930	1732	750	311	156	270
1000	295	930	1732	800	305	153	264
1000	295	930	1732	850	300	150	260
1000	295	930	1732	900	297	149	258
1000	295	930	1732	950	296	148	256
1000	295	930	1732	1000	295	148	255

Таблица 10

$\Theta = 40^\circ$							40
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	316	930	1732	0	930	598	712
1000	316	930	1732	10	929	597	712
1000	316	930	1732	30	921	592	705

1000	316	930	1732	50	904	581	693
1000	316	930	1732	100	840	540	643
1000	316	930	1732	150	759	488	581
1000	316	930	1732	200	679	437	520
1000	316	930	1732	250	609	392	467
1000	316	930	1732	300	550	354	422
1000	316	930	1732	350	502	323	385
1000	316	930	1732	400	463	298	355
1000	316	930	1732	450	431	277	330
1000	316	930	1732	500	405	260	310
1000	316	930	1732	550	384	247	294
1000	316	930	1732	600	367	236	281
1000	316	930	1732	650	353	227	270
1000	316	930	1732	700	342	220	262
1000	316	930	1732	750	333	214	255
1000	316	930	1732	800	327	210	250
1000	316	930	1732	850	322	207	246
1000	316	930	1732	900	318	205	244
1000	316	930	1732	950	317	204	243
1000	316	930	1732	1000	316	203	242

Таблиця 11

$\Theta = 50^\circ$							50
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	344	930	1732	0	930	712	598
1000	344	930	1732	10	929	712	597
1000	344	930	1732	30	922	707	593
1000	344	930	1732	50	909	696	584
1000	344	930	1732	100	854	654	549
1000	344	930	1732	150	782	599	503
1000	344	930	1732	200	709	543	456
1000	344	930	1732	250	642	492	413
1000	344	930	1732	300	585	448	376
1000	344	930	1732	350	537	411	345
1000	344	930	1732	400	497	381	319
1000	344	930	1732	450	464	356	298
1000	344	930	1732	500	438	335	281
1000	344	930	1732	550	416	318	267
1000	344	930	1732	600	398	305	256

Таблица 12

$\Theta = 60^\circ$							60
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	379	930	1732	0	930	805	465
1000	379	930	1732	10	929	805	465
1000	379	930	1732	30	924	800	462
1000	379	930	1732	50	913	791	456
1000	379	930	1732	100	868	751	434
1000	379	930	1732	150	806	698	403
1000	379	930	1732	200	741	642	371
1000	379	930	1732	250	680	589	340
1000	379	930	1732	300	625	541	312
1000	379	930	1732	350	578	500	289
1000	379	930	1732	400	538	466	269
1000	379	930	1732	450	505	437	252
1000	379	930	1732	500	477	413	238
1000	379	930	1732	550	454	393	227
1000	379	930	1732	600	436	377	218
1000	379	930	1732	650	420	364	210
1000	379	930	1732	700	408	354	204
1000	379	930	1732	750	398	345	199
1000	379	930	1732	800	391	339	195
1000	379	930	1732	850	386	334	193
1000	379	930	1732	900	382	331	191
1000	273	930	1732	950	274	237	137
1000	379	930	1732	1000	379	328	189

Таблиця 13

$\Theta = 70^\circ$							70
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	416	930	1732	0	930	874	318
1000	416	930	1732	10	929	873	318
1000	416	930	1732	30	925	869	316
1000	416	930	1732	50	916	861	313
1000	416	930	1732	100	879	826	301
1000	416	930	1732	150	828	778	283
1000	416	930	1732	200	770	724	263
1000	416	930	1732	250	714	671	244
1000	416	930	1732	300	663	623	227
1000	416	930	1732	350	618	580	211
1000	416	930	1732	400	579	544	198
1000	416	930	1732	450	545	513	186
1000	416	930	1732	500	518	486	177
1000	416	930	1732	550	494	465	169
1000	416	930	1732	600	475	446	162
1000	416	930	1732	650	459	432	157
1000	416	930	1732	700	447	420	153
1000	416	930	1732	750	436	410	149
1000	416	930	1732	800	429	403	147
1000	416	930	1732	850	423	397	145
1000	416	930	1732	900	419	394	143
1000	416	930	1732	950	417	392	142

1000	416	930	1732	1000	416	391	142
------	-----	-----	------	------	-----	-----	-----

Таблица 14

$\Theta = 80^\circ$							80
l	R1	R0	L	X	Y0	Z	Y
1000	447	930	1732	0	930	916	161
1000	447	930	1732	10	930	915	161
1000	447	930	1732	30	926	912	161
1000	447	930	1732	50	919	905	159
1000	447	930	1732	100	887	874	154
1000	447	930	1732	150	842	830	146
1000	447	930	1732	200	792	780	137
1000	447	930	1732	250	740	729	128
1000	447	930	1732	300	692	682	120
1000	447	930	1732	350	649	639	113
1000	447	930	1732	400	611	601	106
1000	447	930	1732	450	578	569	100
1000	447	930	1732	500	550	542	95
1000	447	930	1732	550	527	519	91
1000	447	930	1732	600	507	500	88
1000	447	930	1732	650	491	484	85
1000	447	930	1732	700	478	471	83
1000	447	930	1732	750	468	461	81

1000	447	930	1732	800	460	453	80
1000	447	930	1732	850	454	447	79
1000	447	930	1732	900	450	443	78
1000	447	930	1732	950	448	441	78
1000	447	930	1732	1000	447	440	78

Таблица 15

$\Theta = 90^\circ$					
l	R1	R0	L	X	Y
1000	460	930	1732	0	930
1000	460	930	1732	10	930
1000	460	930	1732	30	926
1000	460	930	1732	50	919
1000	460	930	1732	100	890
1000	460	930	1732	150	848
1000	460	930	1732	200	800
1000	460	930	1732	250	750
1000	460	930	1732	300	703
1000	460	930	1732	350	661
1000	460	930	1732	400	624
1000	460	930	1732	450	591
1000	460	930	1732	500	564
1000	460	930	1732	550	540

1000	460	930	1732	600	521
1000	460	930	1732	650	505
1000	460	930	1732	700	492
1000	460	930	1732	750	481
1000	460	930	1732	800	473
1000	460	930	1732	850	467
1000	460	930	1732	900	463
1000	460	930	1732	950	461
1000	460	930	1732	1000	460

За отриманими розрахунками будемо профіль сопла для $\Theta = 0^\circ$ та $\Theta = 90^\circ$

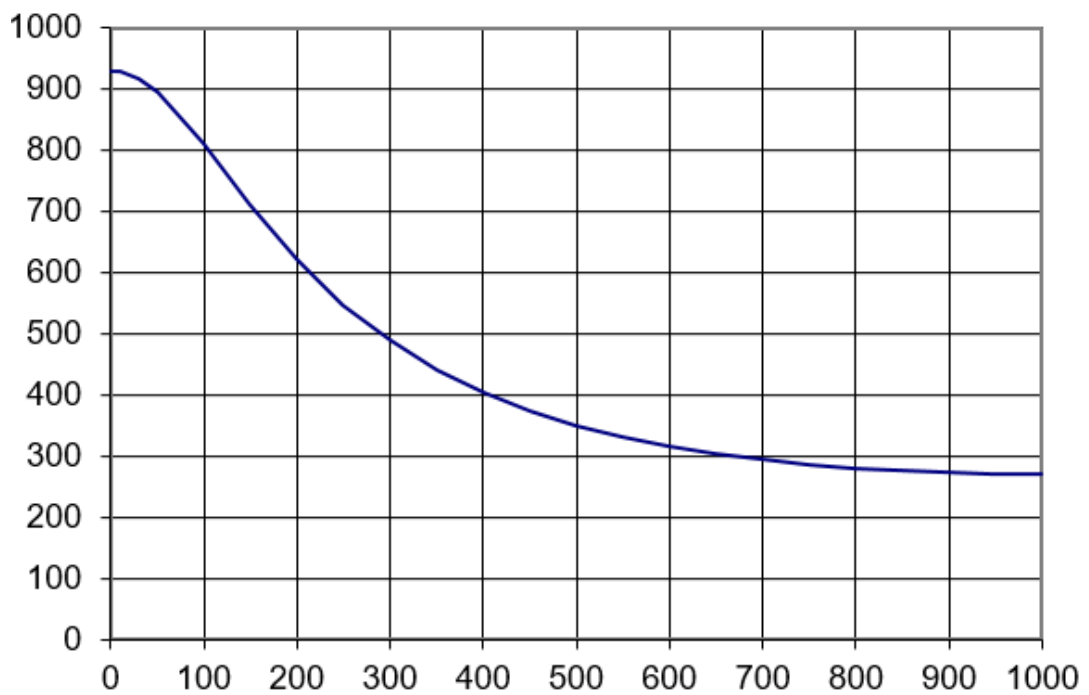


Рисунок 2.3 Профіль сопла для $\Theta = 0^\circ$

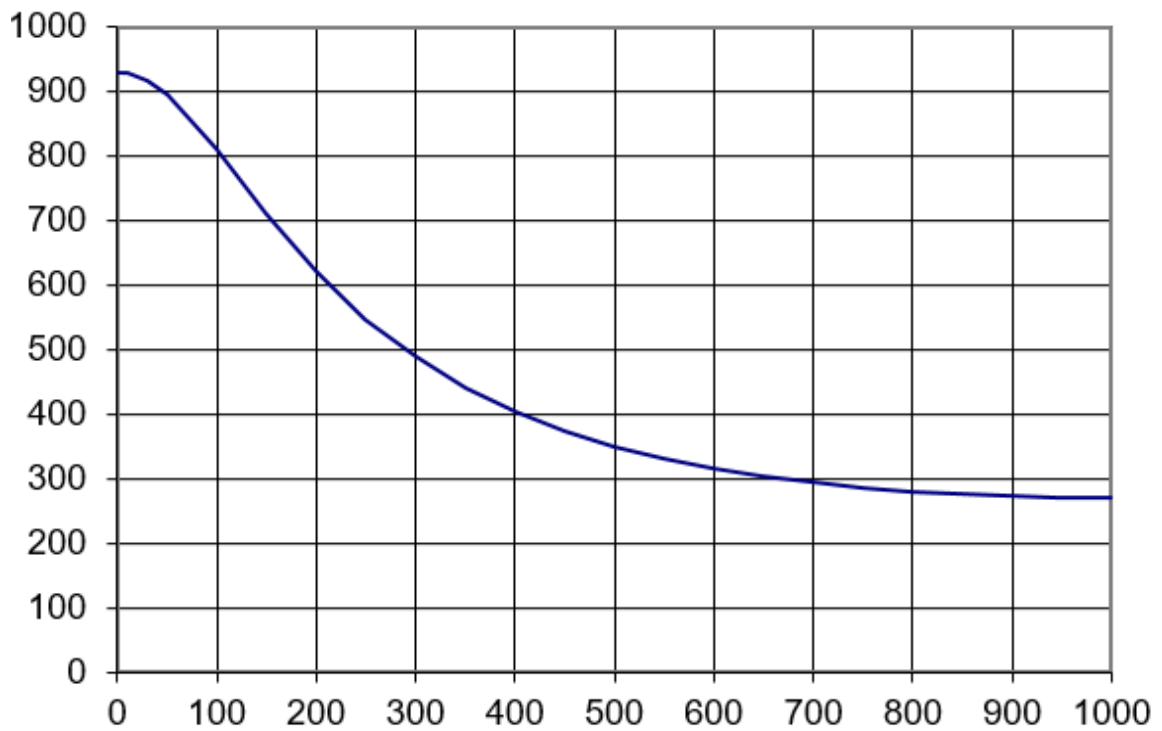


Рисунок 2.4 Профіль сопла для $\Theta = 90^\circ$

За допомогою наведених вище розрахунків було отримано координати січення сопла АДТ для різних кутів нахилу повздовжнього перерізу, отримані данні було занесено у наступну таблицю:

Таблиця 16

X = 0		Θ	X = 100	
Z	Y		Z	Y
0	930	0	0	809
162	916	10	141	799
318	874	20	280	768
465	805	30	414	716
598	712	40	540	643
712	598	50	654	549
805	465	60	751	434
874	318	70	826	301
916	162	80	874	154

930	0	90	890	0
-----	---	----	-----	---

Таблиця 17

X = 200		Θ	X = 400	
Z	Y		Z	Y
0	621	0	0	404
109	616	10	71	402
218	598	20	143	393
327	566	30	218	378
437	520	40	298	355
543	456	50	381	319
642	371	60	466	269
724	263	70	544	198
780	137	80	601	106
800	0	90	624	0

Таблиця 18

X = 1000	
Z	Y
0	270
40	269
80	266
120	261
160	253
200	243
240	230
280	214
320	194
360	168
400	133

440	79
455	40
460	0

За отриманими даними креслимо січення сопла АДТ:

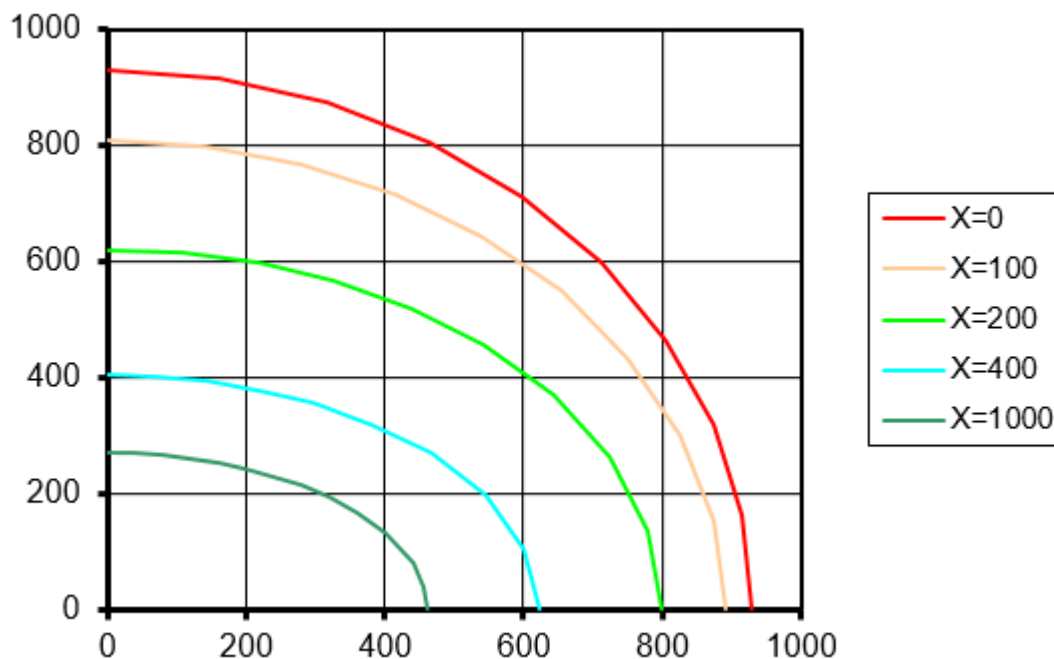


Рисунок 2.5 Січення сопла АДТ

Висновок до другого розділу

В другому розділі було проведено розрахунок геометричних параметрів сопла, а саме:

- розрахунок координат січення робочої частини АДТ.
- розрахунок радіусу робочої частини АДТ для різних кутів нахилу продольного січення.
- Розрахунок профіля сопла для різних кутів нахилу повздовжнього перерізу.

Отримані значення були занесені в таблиці, за допомогою отриманих значень було отримано січення сопла.

Отримані дані також будуть використовуватись в наступних розділах для побудови СЕО моделі сопла.

Розрахунок розподілу тиску в перерізах сопла

3.1 Розрахунок елементів апаратів, навантажених внутрішнім тиском (безмоментна теорія)

Розрахунок елементів тонкостінних конструкцій і апаратів з углеродистих і легированих сталей, що працюють при одноразових та багаторазових статичних навантаженнях під внутрішнім надлишковим тиском, вакуумом або

зовнішнім тиском і під дією осьових і поперечних зусиль і згинальних моментів, здійснюється згідно з ГОСТ 14249-89.

При проектному розрахунку визначають виконавчу товщину стінки за максимальним значенням розрахункової товщини для робочих умов або умов випробувань.

При перевірочному розрахунку для робочих умов і умов випробувань визначається допустимий тиск, який повинний бути не менше розрахункового і пробного тиску відповідно.

Безмоментна теорія розрахунку тонкостінних оболонок передбачає такі припущення:

1. Товщина оболонки повинна бути досить малою в порівнянні з її іншими геометричними розмірами.

Наприклад, для циліндра $\frac{s}{D} \leq 0.1$, де D – внутрішній діаметр оболонки.

Внаслідок малої товщини нормальні напруги растяження або стиснення по товщині оболонки не змінюються, величина їх в D/s разів більше вигинистих, що і визначає безмоментний стан.

2. За формою конструкція обов'язково повинна представляти оболонку обертання.
3. Навантаження (тиск на стінки) повинна бути симетричною відносно осі обертання.

Тиск на стінки може змінюватися уздовж осі обертання, наприклад, при наявності рідини в вертикальному апараті. Такий апарат можна вважати по мембранної теорії, однак якщо його покласти горизонтально, то навантаження стане несиметрична осі, і використання теорії буде неможливо.

Тиск на стінки може змінюватися уздовж осі обертання, наприклад, при наявності рідини в вертикальному апараті. Такий апарат можна вважати по мембранної теорії, однак якщо його покласти горизонтально, то навантаження стане несиметрична осі, і використання теорії буде неможливо. Від дії внутрішнього тиску в матеріалі тонкостінних оболонок (рис. 3.1) виникають нормальні зусилля U і T , поперечні сили Q , а також згинальні моменти M_T і M_t . Причому в міру віддалення від так званої лінії спотворення (тобто місця, де різко змінюється хоча б один з основних параметрів навантаженої оболонки: форма або напрям меридіана, товщина стінки, навантаження, властивості матеріалу і т. п.) Моменти M_T , M_t і сили Q швидко зменшуються і стають мізерно малими, зусилля ж U і T залишаються найважливішими.

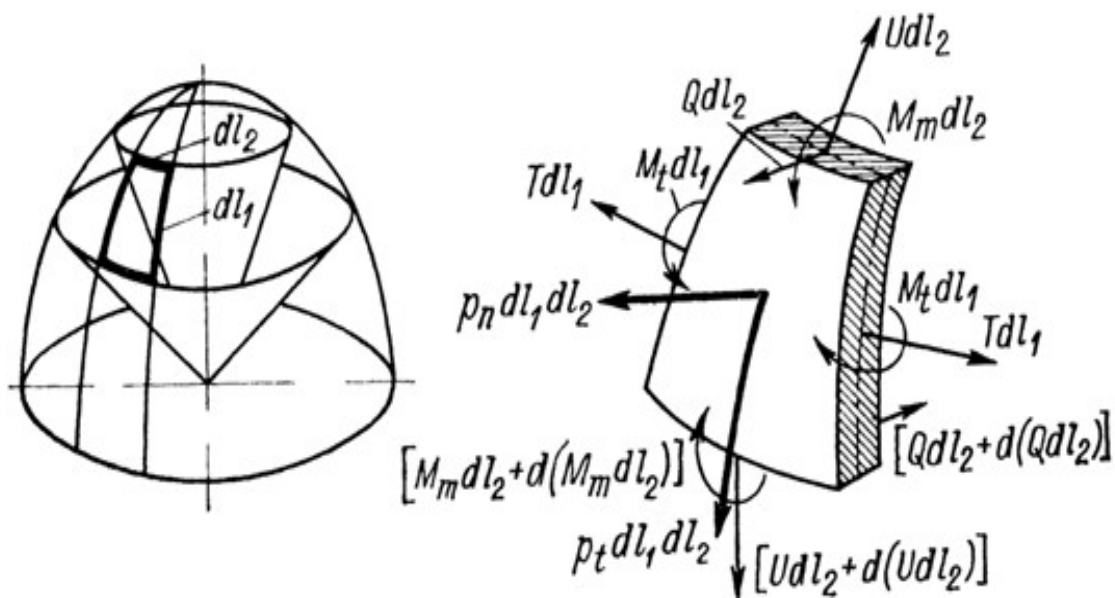


Рисунок 3.1 Схема дії навантажень на елемент стінки осесиметричної оболонки

На рис. 3.2 представлена схема дії зусиль на елемент, виділений з осесиметричної оболонки. Зовнішнє навантаження, віднесене до одиниці

площі серединної поверхні з головними радіусами кривизни R_1 , R_2 і розподілене симетрично щодо осі, розкладене на складові p_n і p_t відповідно по нормалі і дотичній до дуги меридіана. До гранях виділеного елемента прикладені внутрішні нормальні зусилля U , розташовані в площині кривизни меридіана і віднесені до одиниці дуги відповідного нормального перетину, а також нормальні зусилля T , що лежать в другій головній площині кривизни. Згинальні моменти і поперечні сили в перетинах дорівнюють нулю. Напруги по товщині стінки розподілені рівномірно.

$$U = \sigma_n \cdot S, \quad T = \sigma_t \cdot S \quad (3.1)$$

де σ_t та σ_n - відповідно меридіональні і кільцеві (тангенціальні) напруги.

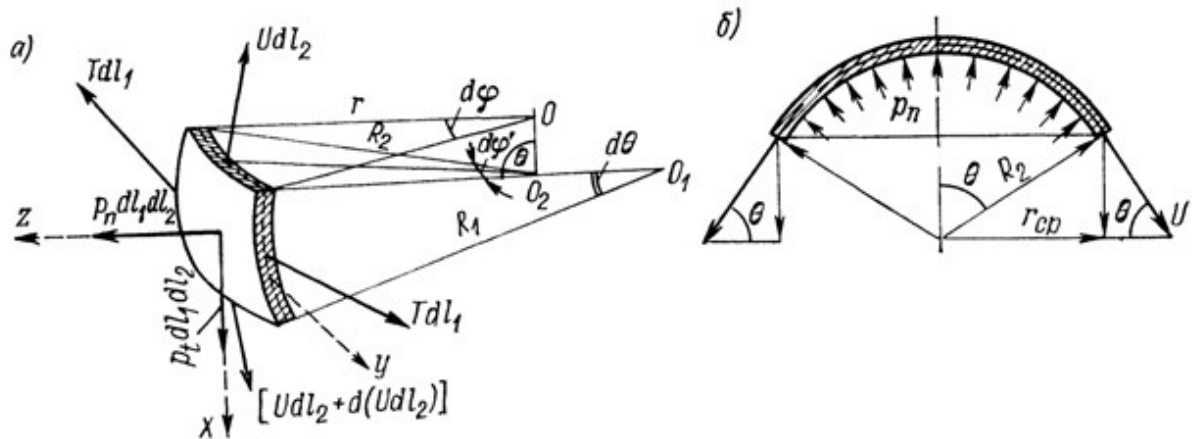


Рисунок.3.2. Схема до визначення меридіональних і кільцевих (тангенціальних) напружень в тонкостінній оболонці: а - елемент стінки; б - відсічена частина оболонки

Рівняння рівноваги діючих на елемент сил (3.2):

$$p_n dl_1 dl_2 - 2Tdl_1 \sin\left(\frac{d\varphi'}{2}\right) - Udl_2 \left(\frac{d\theta}{2}\right) - \left[Udl_2 + d(Udl_2) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)\right] = 0 \quad (3.2)$$

З огляду на, що $dl_1 = R_1 d\theta$; $dl_2 = R_2 d\varphi$ і замінюючи через малість синуси їх аргументами, отримаємо (нехтуючи нескінченно малими вищого порядку) так зване рівняння Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_t}{R_2} = \frac{P_n}{S} \quad (3.3)$$

Розглянувши дію сил на частину оболонки (рис. 1.2,б), відсічену нормальним конічним перетином, можна написати вираз:

$$2\pi \cdot r_{\text{сб}} \cdot U \cdot \sin \theta = \pi \cdot r^2 \cdot P_n, \quad (3.4)$$

звідси з урахуванням (3.1) і відношенням $r \approx r_{\text{сб}} = R_2 \sin \theta$

$$\sigma_m = \frac{P_n}{2S} \cdot R_2 \quad (3.5)$$

Вирази (1.2) і (1.3) є основними рівняннями без-моментної теорії оболонок, виходячи з яких з урахуванням $p_n = p_p$, $p_t = 0$, а також умови міцності

$\sigma = \max \{ \sigma_m; \sigma_t \} \leq \varphi[\sigma]$ і відповідних значень головних радіусів кривизни R_1 і R_2 отримують основні розрахункові залежності для циліндричних, конічних, сферичних і еліптичних оболонок.

Тонкостінна циліндрична оболонка, навантажена внутрішнім газовим тиском p (рис 31.3). Радіуси меридионального і кільцевого перерізів дорівнюють відповідно

$$R_1 = \infty; R_2 = R,$$

де R – радіус циліндра.

Тоді за рівнянням Лапласа (рівноваги елемента оболонки)

$$\frac{\sigma_x}{R_1} + \frac{\sigma_z}{R_2} = \frac{P_z}{S} \quad (3.5)$$

З рівняння рівноваги зони оболонки (без урахування ваги середовища і оболонки) отримаємо:

$$\sigma_x = \frac{P}{2s} R; \sigma_z = \frac{P}{s} R; \quad (3.6)$$

В дійсності в результаті дії нормальних напружень в стінці тонкостінної судини все ж виникають згинальні моменти, які змінюють кривизну оболонки. Для оцінки їх значення розглянемо визначення кільцевих моментів в циліндричній оболонці (рис. 1.3).

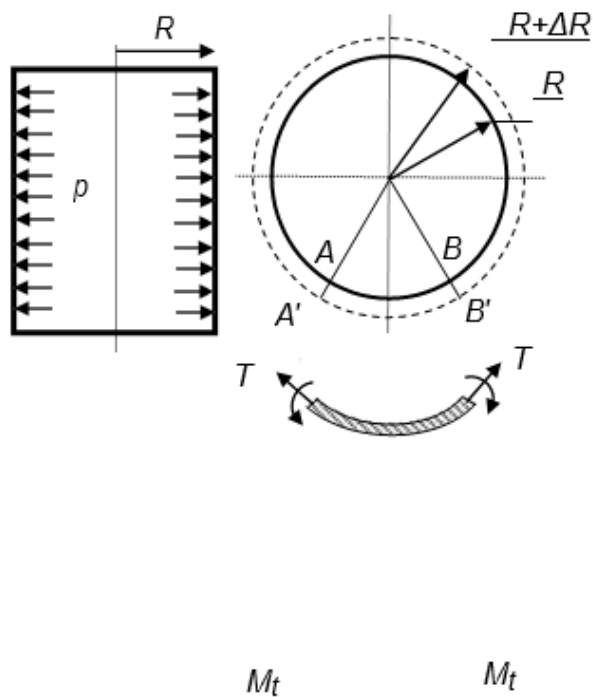


Рис 3.3 Розрахункова схема оболонки

В результаті пружної деформації від тиску p дуга АВ приймає розмір А'В'. Це відбувається за рахунок розтягують сил T . Кривизна дуги зменшується за рахунок дії кільцевих моментів M_t , що лежать в площині кільця.

Відносне подовження елемента циліндра визначається за формулою (3.7):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E}, \quad (3.7)$$

де E – модуль пружності матеріала циліндра.

Для циліндричної обічайки

$$\varepsilon = \frac{pR}{2sE} \quad (3.8)$$

Під впливом моменту M_t змінюється кривизна елемента, тобто радіус R отримує приріст ΔR :

$$R + \Delta R = R + \varepsilon \cdot R = R + \frac{p \cdot R^2}{2s \cdot E}, \quad (3.9)$$

Величину зміни кривизни елемента під впливом моменту M_t можна виразити наступним чином:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \Delta R} = \frac{M_t}{EJ} \quad (3.10)$$

з рівняння (3.10) виразимо (3.11):

$$M_t = EJ \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \Delta R} \right) \quad (3.11)$$

Перетворюючи вираження в дужках, і враховуючи, що

$R_2 \gg R + \Delta R$, отримаємо

$$M = \frac{P}{Js} \quad (3.12)$$

$$\Delta R = \frac{pR^2}{sE} \quad (3.13)$$

Відносячи кільцевий момент до одиниці довжини стінки, тобто до прямокутника довжиною l і шириною s , знаходимо:

$$J = \frac{l \cdot s^3}{12} \quad (3.14)$$

Таким чином, величина напруження від вигину в циліндричній обічайці дорівнює приблизно $p/2$, що в R/s разів менше σ .

Тонкостінна сферична оболонка, навантажена внутрішнім газовим тиском p (рис. 3.4). Радіуси меридіонального і кільцевого перерізів дорівнюють радіусу кулі: $R_1 = R_2 = R$.

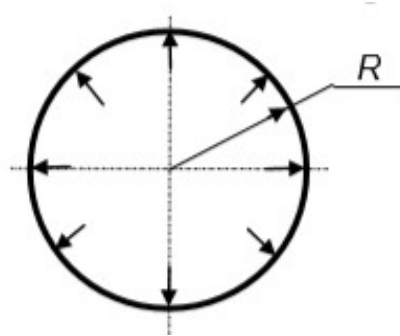


Рисунок 3.4 Розрахункова схема сферичної оболонки

За рівняння рівноваги зони оболонки (без урахування ваги середовища і оболонки) отримаємо:

$$2U \sin \beta - pR \sin \beta = 0 \quad (3.15)$$

$$U = \frac{pR}{2}; \sigma_m = \frac{pR}{2S} \quad (3.16)$$

Із рівняння Лапласа отримаємо:

$$\frac{\sigma_m}{R} + \frac{\sigma_t}{R} = \frac{p}{s} \quad (3.17)$$

звідси $\sigma_t = -\sigma_m + \frac{pR}{2S}$, і тоді мембрані напруження розраховуються за формулою 3.18:

$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{pR}{2S} \quad (3.18)$$

Тонкостінна конічна оболонка, навантажена внутрішнім газовим тиском p (рис. 3.5).

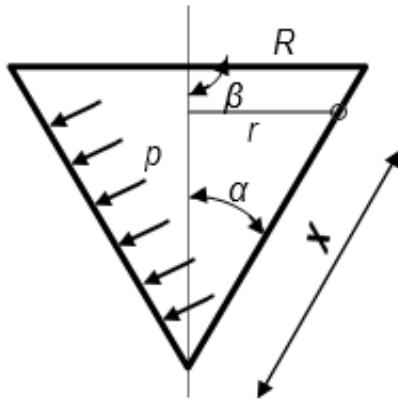


Рисунок 3.5 Розрахункова схема конічної оболонки

Для можливого застосування рівняння рівноваги зони оболонки висловимо поточний радіус і кут β через відомі величини:

$$r = x \sin \alpha;$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha;$$

$$\sin \beta = \cos \alpha;$$

Тоді (без урахування ваги середовища і оболонки) отримаємо:

$$\delta_m = \frac{p \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2s}. \quad (3.19)$$

За рівнянням Лапласа ($R_1 = \infty$; $R_2 = R(x) = x \operatorname{tg} \alpha$)

$$\sigma_t = \frac{p \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{s} \quad (3.20)$$

Мембранні напруження в конічній оболонці біля основи конуса дорівнюють:

$$\sigma_n = \frac{p \cdot R}{2s \cdot \cos \alpha}, \quad \sigma_t = \frac{p \cdot R}{s \cdot \cos \alpha}.$$

Визначимо напруги в еліптичному дні. Нехай піввісь еліпса будуть рівні $D/2$ і H . Радіуси кривизни еліпсоїда в довільній точці характеризуються рівняннями:

$$R_1 = \frac{R_0}{\sqrt{(1 + \sin^2 \theta)^3}}; \quad R_2 = \frac{R_0}{\sqrt{(1 + \sin^2 \theta)}};$$

де θ – кут між нормалю і осю обертання; $R_0 = \frac{D}{2} \sqrt{1 + \gamma}$ – радіус кривизни в

вершині (при $\theta=0$); $\lambda = \frac{(D/2)^2 - H^2}{H^2}$ – параметр, який визначає форму еліпса.

Підставляючи значення R_1 і R_2 в рівняння безмоментної теорії оболонок, отримуємо:

$$\sigma_m = \frac{pD}{4s} \frac{\sqrt{1+\gamma}}{\sqrt{1+\sin\theta}}; \quad (3.21)$$

$$\sigma_t = \frac{pD}{4s} \frac{\sqrt{1+\gamma}(1-\gamma\sin^2\theta)}{\sqrt{1+\gamma\sin\theta}}; \quad (3.22)$$

З формул (3.6) - (3.33) видно, що при однаковому тиску, діаметрах судин і товщиною стінки максимальне нормальне напруження циліндричної оболонки в 2 рази більше нормального напруги сферичної і в $(1/\cos\alpha)$ разів менше конічної.

Згідно безмоментної теорії розрахунку на міцність в кожному елементі тонкостінної судини діє два напруги - меридіональне σ_m і кільцеве σ_t , причому завжди $\sigma_t \geq \sigma_m$.

Мембранна теорія не враховує радіальних (σ_r) і згинальних (σ) напружень (в принципі $\sigma_r = p$, $\sigma = p/2$ внаслідок їх малості в порівнянні з кільцевими і меридіональними. Тому для розрахунку товщини стінки тонкостінних оболонок застосовують третю теорію міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}},$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентне напруження; σ_{max} – максимальне напруження; σ_{min} – мінімальне напруження.

Умова міцності має вигляд $\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]$.

В випадку мембранної теорії $\sigma_{\text{max}} = \sigma_t$; $\sigma_{\text{min}} = \sigma_r \approx 0$, звідси

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_t, \text{ або } \sigma_t \leq [\sigma]$$

Якщо прийняти, що $\sigma_t = [\sigma]$, то для випадку тонкостінного циліндра можна отримати розрахункову формулу для товщини стінки:

$$s_p = \frac{pD_{ср}}{2[\sigma]} \quad (3.23)$$

де $D_{ср}$ – серединний діаметр.

Враховуючи наявність зварних швів, виконавча товщина циліндра буде рахуватися за формулою (3.24):

$$s = \frac{pD_{ср}}{2\gamma[\sigma]} + c + c_0 \quad (3.24)$$

де γ - коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва.

Підставляючи в рівняння (3.24) замість діаметра $D_{ср}$ серединної поверхні внутрішній діаметр $D = D_{ср} - s$, отримаємо для циліндра :

$$s = \frac{pD}{2\gamma[\sigma] - p} + c + c_0 \quad (3.25)$$

Аналогічним чином можна отримати вирази для інших оболонок.

4. Формування скінченно-елементної моделі сопла АТД

Для уточненої оцінки значень напруг в соплі розроблена скінченно-елементна модель (СЕМ), оскільки метод скінченних елементів (МСЕ) дозволяє оцінювати характер розподілу напружень по хорді січення сопла.

4.1 Принципи скінченно-елементного моделювання конструкції сопла

Основним елементом силового набору сопла є обшивка, яка сприймає навантаження від внутрішнього тиску. Оскільки обшивка сприймає основні поздовжні навантаження, ми вважаємо її частиною поздовжнього набору.

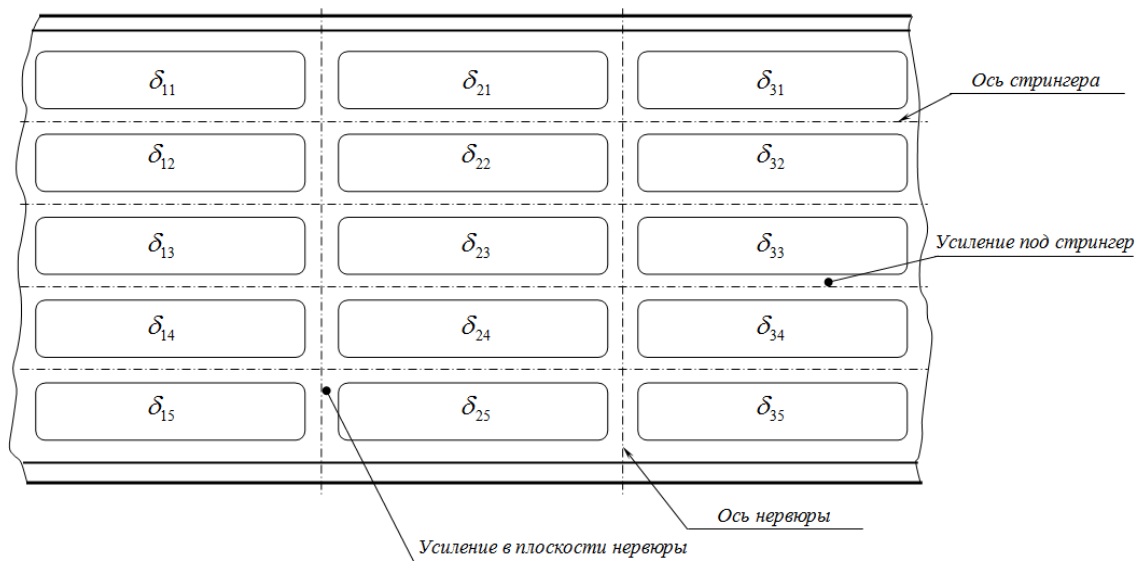


Рисунок 4.1 Ескіз фрагмента типової панелі обшивки

(δ_{ij} – місцева товщина обшивки)

У регулярних зонах конструкції сопла максимально можливу кількість варіантів товщини обшивки відповідає кількості проміжків, укладених між двома сусідніми нервюрами і двома сусідніми елементами поздовжнього набору, які в подальшому будемо називати "зонами постійної товщини обшивки" (ЗПТО). Такий ступінь дискретності товщин обшивки обумовлена технологічними і економічними критеріями (рис. 4.1).

Зважаючи на відсутність великих градієнтів товщини, для моделювання

однієї ЗПТО регулярної зони кесона досить одного плоского КЕ (рис. 4.2). Таким чином, кількість КЕ, що моделюють обшивку сопла в регулярних зонах, приблизно відповідає кількості ЗПТО.

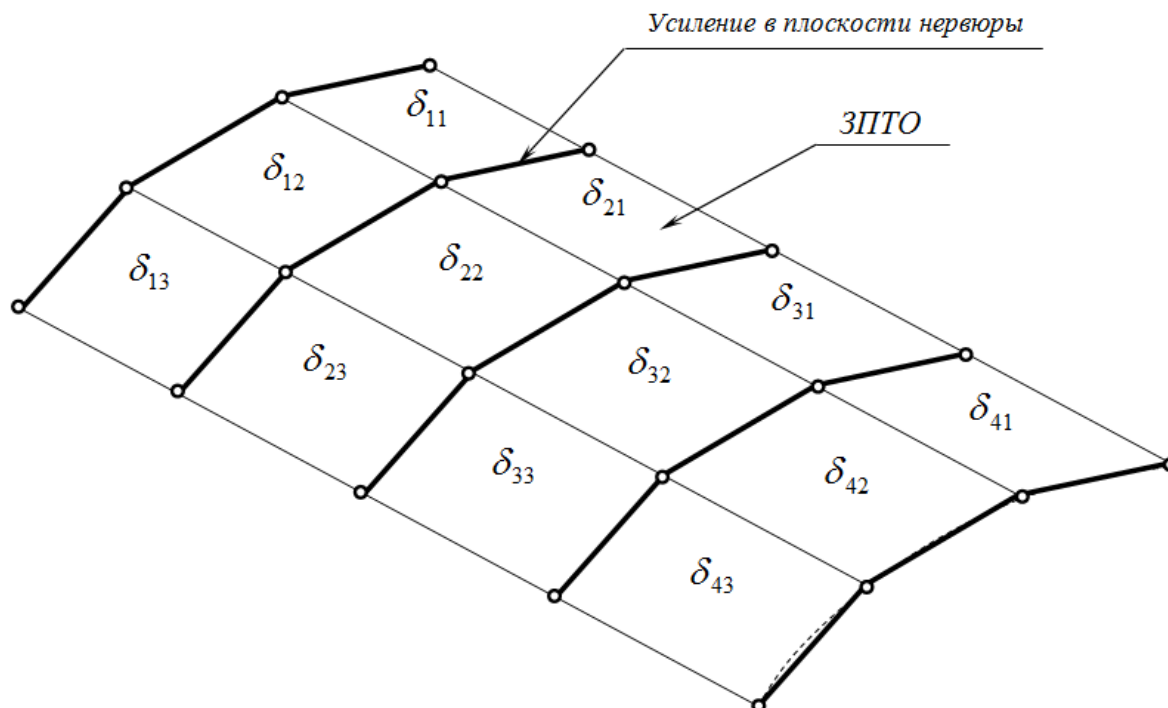


Рисунок 4.2 Структура СЕМ обшивки в регулярній зоні сопла

Стрингери моделюються у вигляді двух-поясних балок (рис.4.3), утворених плоскими чотирикутними СЕ, окантованими стрижневими КЕ. Плоскі СЕ забезпечують моделювання стінок стрингерів. В якості поздовжніх обконтуючих елементів використовуються стрижневі СЕ, що моделюють "посилення" обшивки в зонах з'єднання зі стрингерами і "шапки" стрингерів.

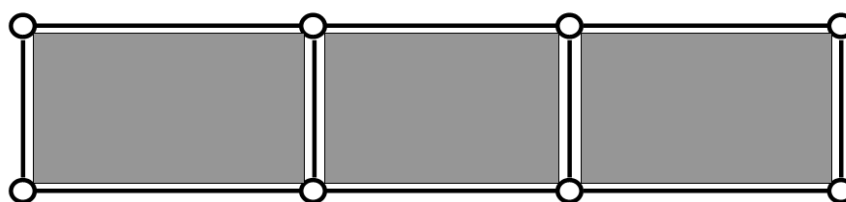


Рисунок 4.3 Модель двух-поясної балки

В якості поперечних обконтуючих елементів використовуються умовні

стрижневі СЕ, що з'єднують вузли, розташовані на теоретичному контурі сопла, з відповідними вузлами, що об'єднують стрижневі СЕ, що моделюють "шапки" стрингерів. Поперечні обкантовуючі елементи, забезпечують моделювання підсилень стінок стрингерів в місцях кріплення кінці і розташовані тільки в площинах звичайних і додаткових нервюр. Осі стрижневих СЕ, що моделюють посилення під стрингери, розташовані на теоретичному контурі сопла, а осі стрижневих СЕ, що моделюють "шапки" стрингерів, проходять через центри тяжкості "шапок"

Моделювання стрингерів у вигляді двох-поясних балок дозволяє використовувати стрижневі СЕ, що мають умовно круглий перетин, що позбавляє від необхідності вводити в модель спеціальні вузли орієнтації.

КЕМ лонжеронів включають в себе наступні елементи:

- стрижневі СЕ, що моделюють горизонтальні стінки верхньої і нижньої полиць;
- чотирикутні СЕ, що моделюють вертикальні стінки верхньої і нижньої полиць;
- стрижневі СЕ, які обкантовують вертикальні стінки верхньої і нижньої полиць

Структурно моделі лонжеронів розділені на окремі ділянки (шпації), обмежені вертикальними стрижневими СЕ, розташованими в площинах нервюр і додаткових перетинів, призначених для підвищення дискретності розрахункової моделі. У свою чергу, стінки лонжеронів в межах кожної шпації розділені по вертикалі на 3 рівних ділянки. При цьому поздовжні обкантовуючі стрижневі СЕ між зазначеними ділянками відсутні. Стійки лонжеронів не моделюються, за винятком межнервюрних прольотів, що містять додаткові перетину.

Крім перерахованих вище СЕ, моделі лонжеронів містять ряд додаткових СЕ,

що моделюють зони стиків. Посилення обшивок в зонах поздовжніх стиків між монолітними панелями обшивки моделюються у вигляді ланцюжків стрижневих SE.

Всі стрижневі й плоскі SE, що моделюють обшивку, стрингери, лонжерони і поздовжні стики повинні сприймати вигибні навантаження (елементи типу "Bar" і "Plate" в MSC.Nastran).

Основним елементом поперечного набору сопла, є типова нервюра, призначена для сприйняття і передачі на елементи поздовжнього набору невеликих і помірних поперечних навантажень. Крім того, типові нервюри перешкоджають зміни контуру відповідних перетинів, викликаному деформацією сопла.

Модель збірної нервюри включає в себе наступні основні елементи:

- стрижневі SE, що моделюють пояса нервюри;
- стрижневі SE, що моделюють кінці;
- умовні стрижневі SE, призначені для окантовки чотирикутних SE, що моделюють стінки стрингерів, з метою передачі навантажень з моделей кінц на моделі стінок стрингерів;
- стрижневі SE, що моделюють стійки нервюр;
- чотирикутні SE, що моделюють компенсатори;
- плоскі SE, що моделюють стінки нервюри.

Кількість і розташування стрижневих SE, що моделюють стійки збірних нервюр, в основному, визначаються необхідністю передачі навантажень з кінц на стінки, і не скрізь відповідають їх реальній кількості і розташуванню. При цьому сумарна жорсткість SE, що моделюють стійки, визначається, виходячи з сумарної жорсткості стінок модельованих нервюр. Кількість і розташування чотирикутних KE, що моделюють компенсатори, в основному,

відповідають їх кількості і розташуванню на модельованих нервюрах.

Кожна модель компенсатора розташовується в площині відповідної нервюри в проміжку, утвореному двома сусідніми стрингерами, теоретичним контуром крила і поясом нервюри, і включає в себе два вузла, розташовані на теоретичному контурі, і два вузла, розташовані на поясі нервюри.

На відміну від інших елементів конструкції, книці і компенсатори моделюються відповідно за допомогою стрижневих СЕ, що працюють тільки на розтяг - стиск (в системі MSC.Nastran елементи типу "Rod"), і чотирикутних СЕ, що працюють тільки на зсув (в системі MSC.Nastran елементи типу "Shear Panel"). Це обумовлено тим, що в реальній конструкції книці працюють тільки на розтяг- стиск, а компенсатори тільки на зрушення, оскільки закріплені відповідно на стрингерах і обшивці.

З метою підвищення дискретності моделі, всі ділянки стінок нервюр, укладені між стійками, додатково розділені по вертикалі на три окремих плоских СЕ, між якими немає додаткових обкантовуючих стрижневих СЕ. Розподіл СЕМ стінок нервюр по висоті обумовлено необхідністю більш точного аналізу розподілу дотичних напружень.

4.2 Структура скінченно-елементної моделі сопла АТД

Формування СЕМ сопла АТД, а також розрахунок і аналіз напружено-деформованного стану здійснювалися за допомогою розрахункового програмного комплексу MSC.Nastran. При цьому призначення координат вузлів, а також вибір кінцевих елементів і завдання їх властивостей проводилися в інтерактивному режимі, з використанням стандартної бібліотеки кінцевих елементів MSC.Nastran.

Верхня і нижня обшивки є основними силовими елементами поздовжнього набору сопла АТД. Для моделювання обшивок використовувалися кінцеві

елементи типу "Plate.

Спрощені СЕМ лонжеронів містять моделі поясів, стінок і стійок. Пояси лонжеронів призначені для забезпечення з'єднання обшивок і стінок лонжеронів, в результаті чого утворюється замкнутий контур. Для моделювання поясів лонжеронів використані стрижневі елементи типу "Bar".

Спрощені моделі нервюр включають моделі стінок і стійок. Оскільки в КЕМ сопла моделюється висота стрингерів, моделі поясів нервюр і підсилень обшивок в зоні кріплення нервюри об'єднані і є послідовно з'єднані стрижневі СЕ типу "Bar".

4.2 Послідовність формування СЕО моделі сопла АТД

1. Після вводу параметрів та властивостей матеріалу вводимо координати вузлів внутрішніх контурів лонжеронів (дані були отримані в другому розділі).

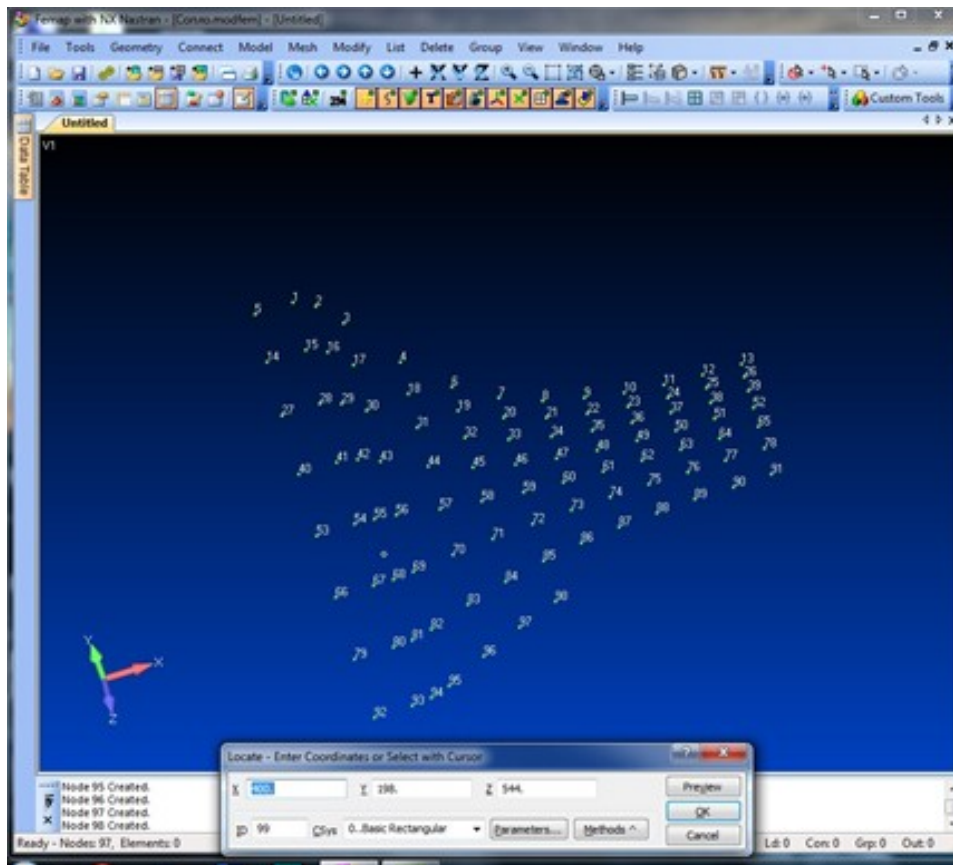


Рисунок 4.4 Координати вузлів внутрішніх контурів лонжеронів

2. Вводимо координати вузлів зовнішніх контурів лонжеронів (дані були отримані в другому розділі).

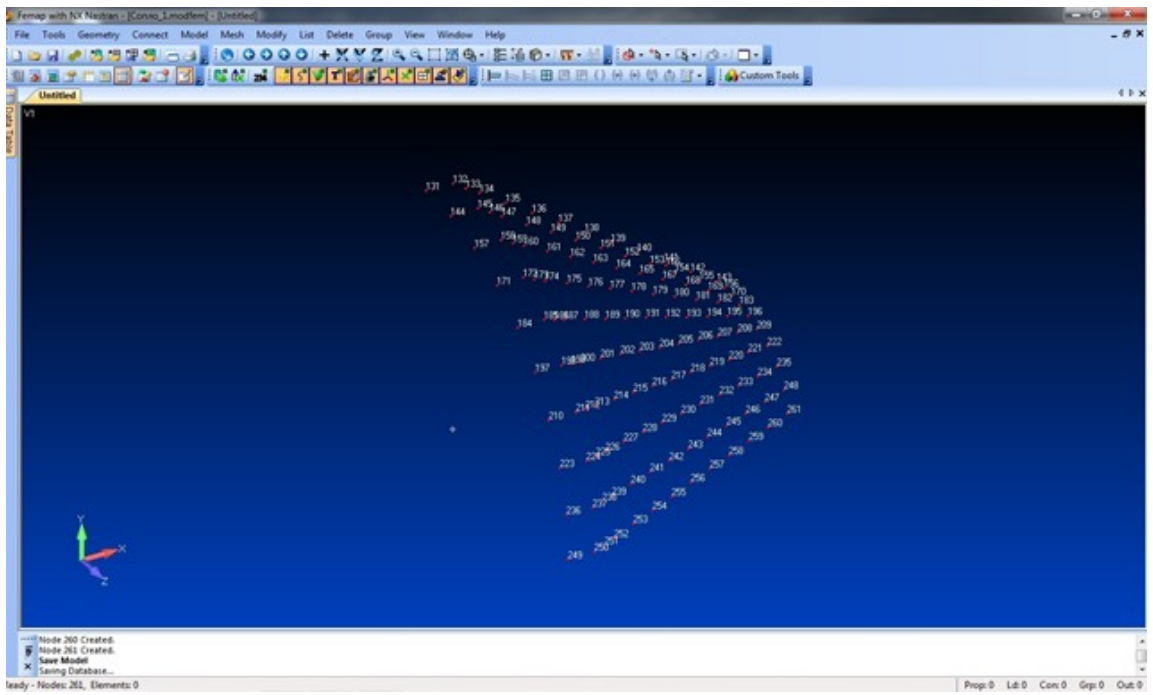


Рисунок 4.5 Координати вузлів зовнішніх контурів лонжеронів

3. Вводимо SE- моделі шпангоутів:

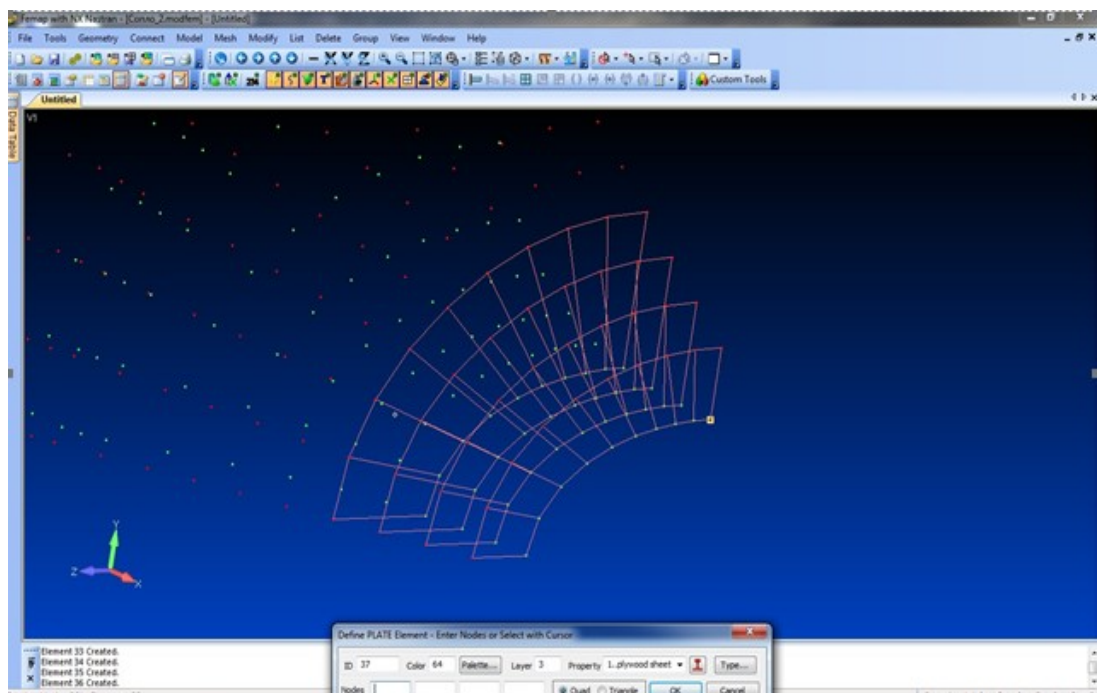


Рисунок 4.6 SE- моделі шпангоутів

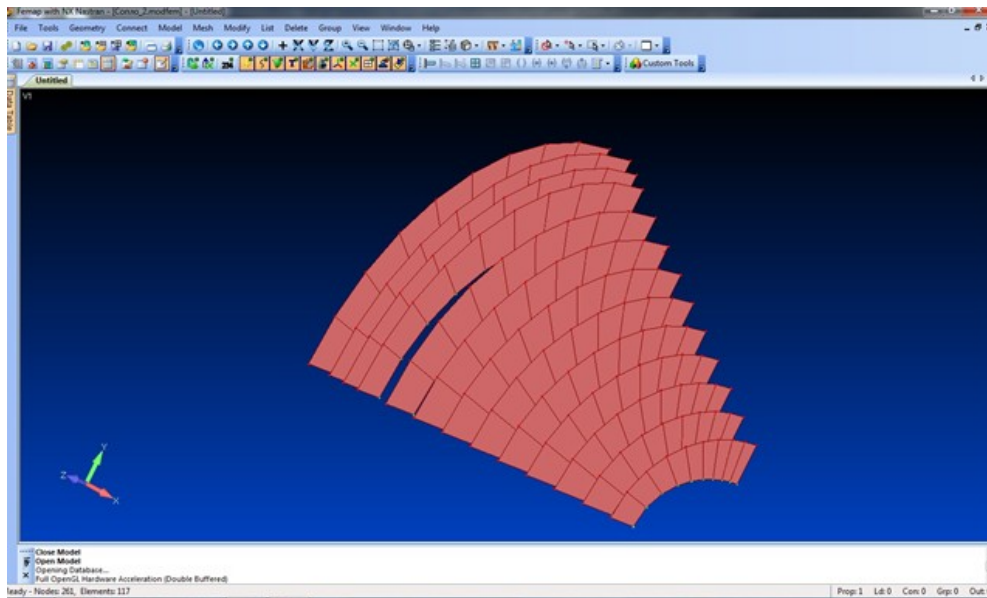


Рисунок 4.7 SE- моделі шпангоутів

4. Вводимо SE- моделі лонжеронів:

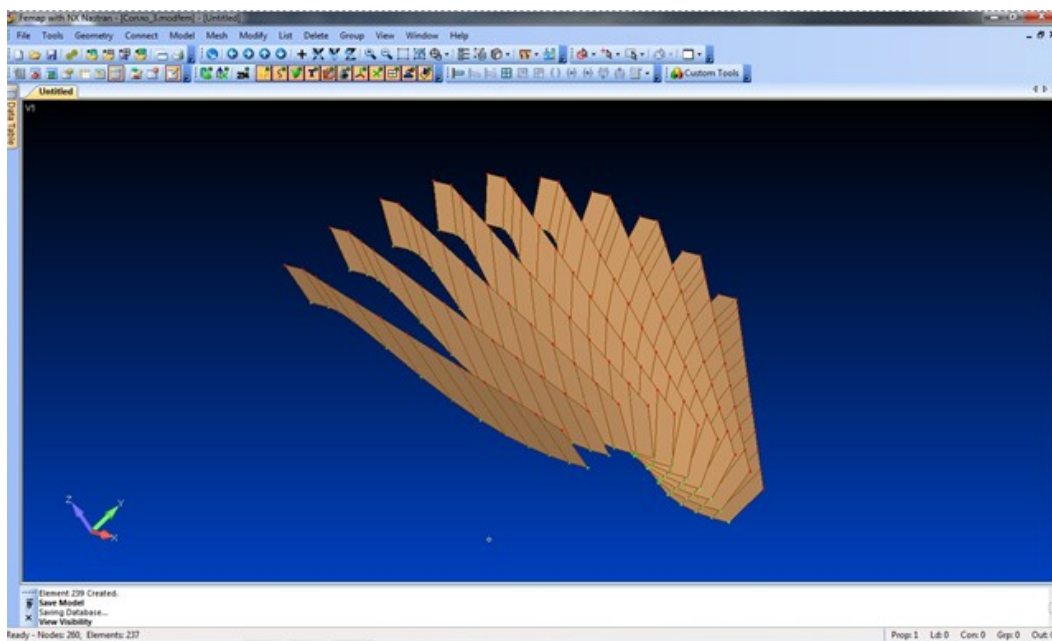


Рисунок 4.8 SE- моделі лонжеронів

5. В результаті спільного відображення повздовжнього та поперечного наборі отримуємо наступний ескіз:

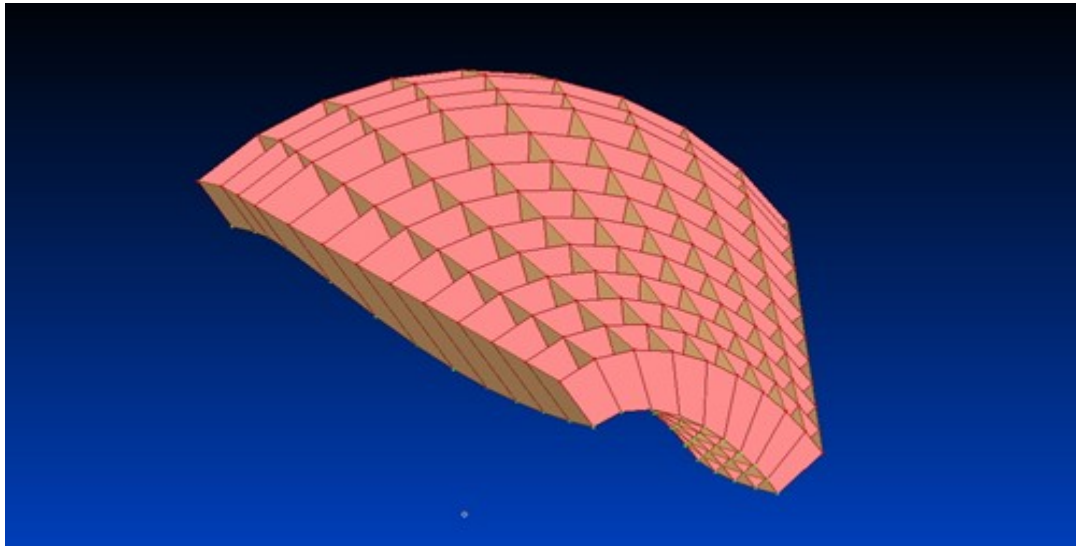


Рисунок 4.9 Спільне відображення поперечного та продольного наборів

6. Моделюємо внутрішню обшивку сопла:

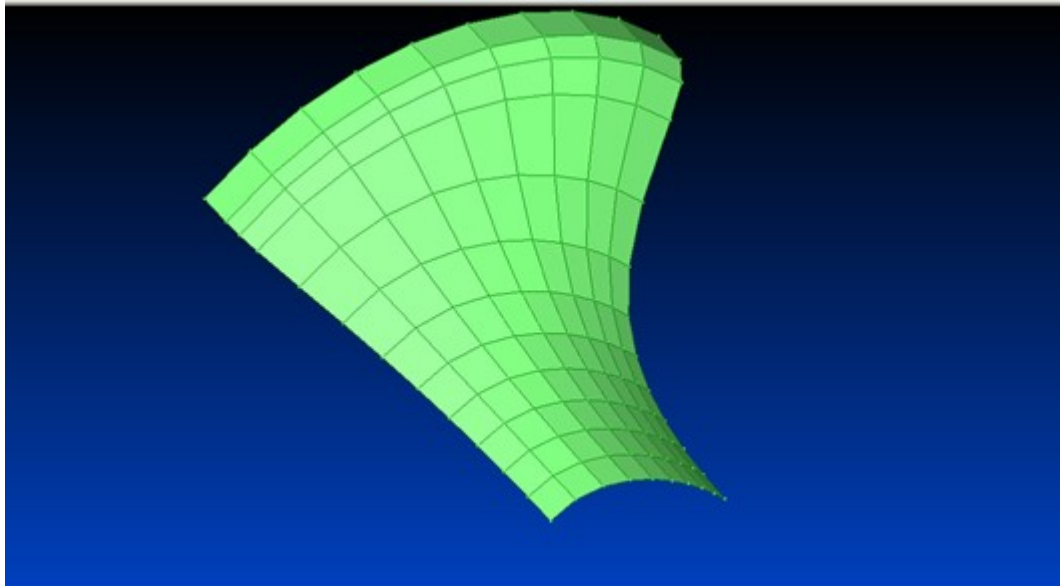


Рисунок 4.10 Внутрішня обшивка сопла

7. Методом відображення будемо $\frac{1}{2}$ моделі, а потім будемо повну модель:

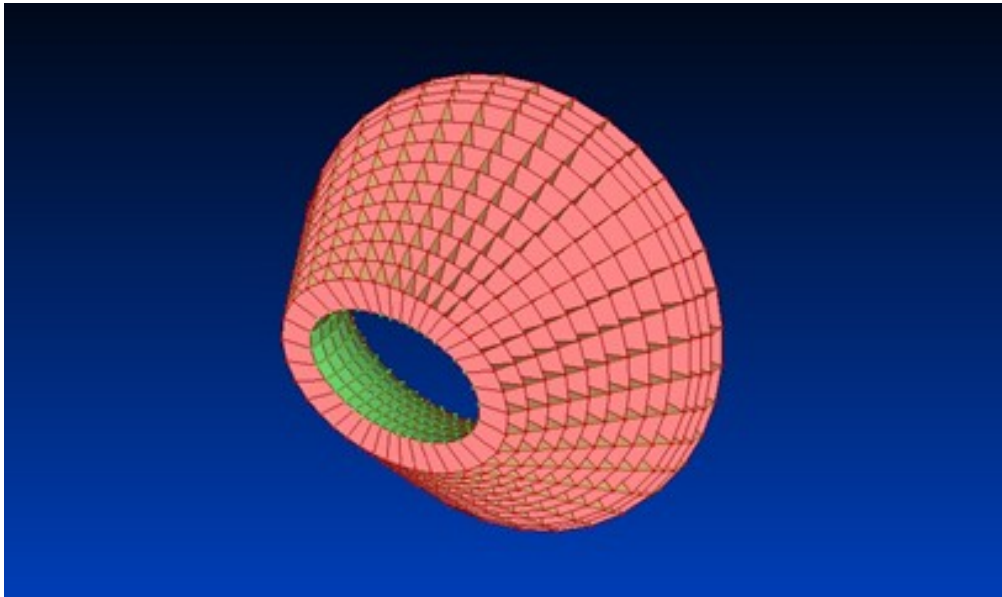


Рисунок 4.11 Модель СЕ сопла АТД

Висновок до дипломного проекту

Метою дипломного проекту було проектування початкової аеродинамічної труби. Після детального аналізу було виявлено, що основні відмінності дозвукових аеродинамічних труб, які полягають в типі робочої частини або в типі контуру. Робочі частини бувають закритої та відкритої типу, контур буває замкненого або не замкненого типу.

Було проведено детальний розрахунок геометричних параметрів, а саме:

- розрахунок координат січення робочої частини АДТ.
- розрахунок радіусу робочої частини АДТ для різних кутів нахилу продольного січення.
- Розрахунок профіля сопла для різних кутів нахилу повздовжнього перерізу.

Завдяки отриманим даним було побудовано СЕО модель сопла АДТ.

Після детального аналізу отриманих розрахунків було зроблено висновки, що розроблене сопло АДТ повністю підходить для необхідних цілей.

Список використаних джерел

- Калугин В.Т. Луценко А.Ю. “АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ ДОЗВУКОВЫХ И СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ ”
- Рябинин А.Н. “Аэродинамические трубы малых скоростей”
- Ахметов И.Г. Научный журнал “Молодой ученый”
- Пэнкхёрст Р. Холдер Д. “Техника эксперимента в аэродинамических трубах”
- Л.В. Виноградов, Ш.Р. Лотфулин “Исследование геометрических параметров сопла с котнтуром Витошинского”
- Красноперое Е. В. Экспериментальная аэродинамика. Ч. I. М.: Транспечать НКПС, 1930. С. 95.
- В. Б. Байдаков, А. С. Клумов, “Аеродинамика полета летальных аппаратов”