

**ПРОЄКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК СТИСНУТОГО ВІДСІКУ  
КОРПУСУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**ПРОЄКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК СТИСНУТОГО ВІДСІКУ  
КОРПУСУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

Методичні рекомендації до виконання  
курсowego проєкту

Харків «ХАІ» 2023

Затверджено науково-методичними комісіями університету

з відповідних галузей знань

9 грудня (протокол № 15), 21 грудня (протокол № 3)

і 28 грудня (протокол № 3) 2022 року

Укладачі: В. Ю. Мірошніков, О. Б. Савін,

В. М. Соболю

## ВСТУП

Проектувальний розрахунок стиснутого стрингерного відсіку є темою другої розрахунково-графічної роботи студентів з дисципліни "Розрахунок літального апарата на міцність".

Самостійне виконання студентом цього завдання має закріпити знання щодо визначення критичних напружень обшивки та стрингерів і виробити вміння визначати параметри силових елементів конструкції літального апарата за умовами міцності.

Вихідними даними для виконання завдання є:

1. Механічні властивості матеріалу.
2. Тип профілю стрингера.
3. Радіус корпусу  $\alpha$ .
4. Експлуатаційне значення стискальної сили  $N^e$ .

5. Параметр  $\varepsilon$ , що визначається як відношення товщини обшивки проєктованого стрингерного відсіку до товщини обшивки безстрингерного відсіку (ця величина задається з метою зменшення трудомісткості завдання; у реальних розрахунках величина має варіюватися).

**Мета завдання:** дослідження впливу параметрів силових елементів на вагову досконалість відсіку; добір оптимальних значень параметрів силових елементів відсіку.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Конструкція відсіку та його вагова досконалість визначаються багатьма параметрами:

- $\delta$  – товщина обшивки відсіку;
- $n$  – кількість стрингерів;
- $f_c$  – площа поперечного перерізу стрингера;
- $\lambda$  – гнучкість полиць і стінок стрингера;
- $a$  – відстань між шпангоутами;
- $F$  – площа поперечного перерізу шпангоута (з метою зниження трудомісткості завдання вважатимемо, що переріз шпангоута є геометрично подібним до перерізу стрингера).

На рис. 1 показано конструктивну схему стрингерного відсіку літального апарата. По довжині його каркаса прокладено набір поздовжніх силових деталей – стрингерів. Стрингери можуть бути металевими пресованими або прокатними, а іноді їх виготовляють з листового гнучкого матеріалу або з прутків з різним профілем поперечного перерізу.

На рис. 1 позначено:  $H$  – висота стрингера,  $S$  – товщина полиці стрингера,  $a$  – відстань між шпангоутами,  $b$  – відстань між стрингерами.

Серед шести величин ( $\delta$ ,  $n$ ,  $f_c$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ,  $F$ ) товщина обшивки  $\delta$  визначається через заданий параметр  $\varepsilon$  за величиною потрібної товщини обшивки безстрингерного відсіку при тих же вихідних даних (див. розд. 2).

На решту параметрів накладаються:

1. Дві умови міцності:

- втрата стійкості обшивки не допускається при меншому навантаженні, ніж експлуатаційне;
- руйнування відсіку (тобто втрата стійкості стрингерів) не допускається при меншому навантаженні, ніж розрахункове.

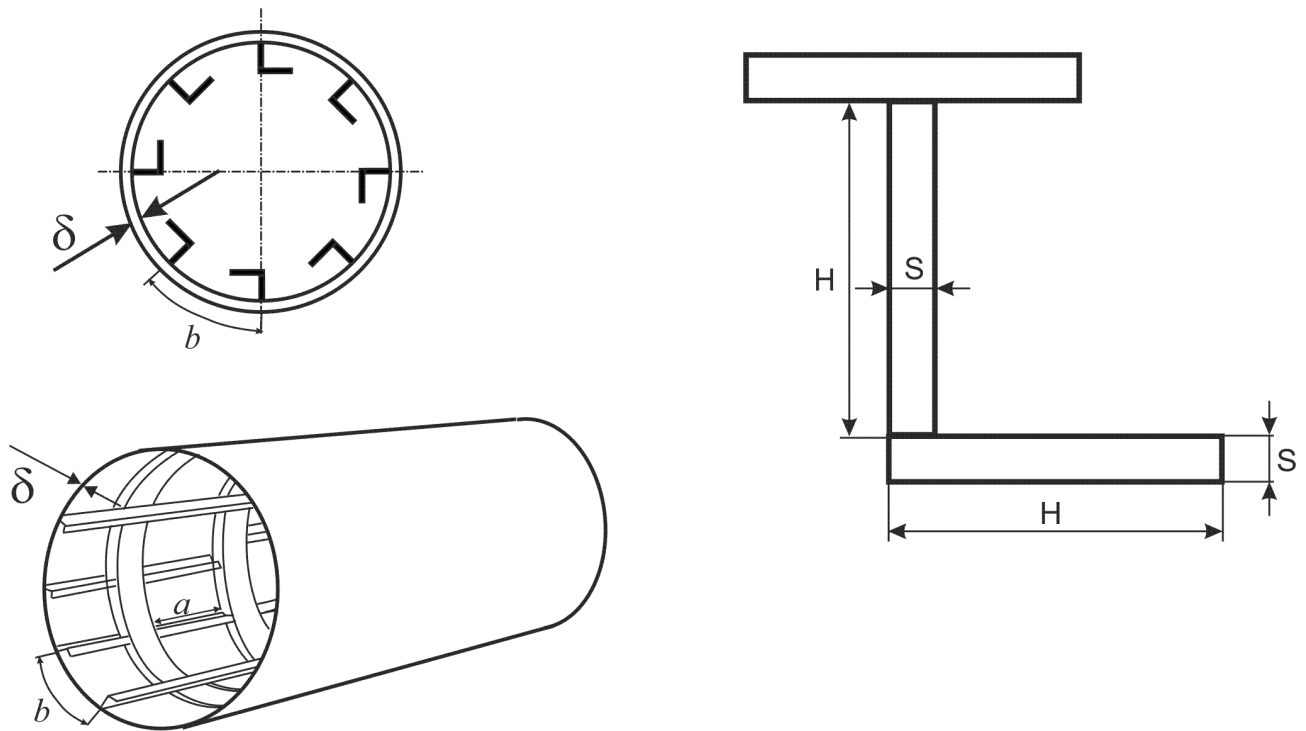


Рис. 1. Схема відсіку літального апарата, переріз стрингера

2. Одна умова оптимальності стрингера: критичні напруження, що відповідають місцевій і загальній формам втрати стійкості стрингера, мають бути однаковими.

3. Одна умова потрібної жорсткості шпангоута: згинальна жорсткість шпангоута має бути достатньою для того, щоб забезпечити відсутність прогинів стрингера над шпангоутом під час деформування у напрямку опуклості стрингера через втрату стійкості.

П'ятою умовою є умова мінімуму ваги (маси) проектованої конструкції. Маса стрингерного відсіку складається з мас обшивки, стрингерів і шпангоутів. Для того щоб виключити вплив довжини відсіку на оцінку його вагової досконалості, зручно перейти до погонної маси й вагову досконалість відсіку оцінювати величиною

$$\bar{G} = \left[ (2\pi R\delta + nf_c) + \frac{2\pi RF}{a} \right] \rho, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу.

Таким чином, задача проєктувального розрахунку стрингерного відсіку при чистому стиску зводиться до задачі на умовний екстремум. При цьому погонна маса є цільовою функцією, а перелічені умови – додатковими умовами.

Нижче пропонується один із можливих методів розв'язання задачі щодо знаходження умовного екстремуму. Основою методу є вибір параметра, що варіюється і має таку властивість, що при будь-якому фіксованому значенні цього параметра з рівнянь, які є додатковими умовами, можна однозначно визначити всі шукані параметри силових елементів (тобто виключити їх із системи рівнянь). Завдяки цьому задача зводиться до дослідження і визначення цільової функції одного параметра.

Варійованим параметром відсіку в задачі є коефіцієнт  $\psi$ , яким визначається розподіл повної осьової сили перерізу  $N^e$  на силу  $N_{обш}^e$ , що створюється напруженнями в обшивці, і силу  $N_{стр}^e$ , що створюється напруженнями у стрингерах. Оскільки при дії експлуатаційного навантаження напруження в обшивці та стрингерах є однаковими (за умовою задачі обшивку та стрингери виготовлено з одного матеріалу), коефіцієнтом  $\psi$  задається й розподіл площі перерізу  $F_{пер}$  на площу обшивки та площу стрингерів:

$$\psi = \frac{N_{обш}^e}{N^e} = \frac{2\pi R\delta}{F_{пер}}, \quad (2)$$

де  $F_{пер}$  – повна площа перерізу, тобто сума площ стрингерів та обшивки.

З формули (2) видно, що коефіцієнт  $\psi$  при фіксованому  $\delta$  визначає несну площу перерізу, причому чим більше  $\psi$ , тим менше площа перерізу. Оскільки величина заданої діючої сили є незмінною, збільшення коефіцієнта  $\psi$  потребує збільшення критичних напружень обшивки та стрингерів. Критичні напруження обшивки збільшуються зі зменшенням відстані між стрингерами, тобто зі збільшенням кількості стрингерів, що приводить до зменшення площі кожного окремого стрингера. Збільшення критичних напружень місцевої втрати стійкості

стрингера потребує зменшення габаритних розмірів перерізу стрингера, тобто зниження його згинальної жорсткості. При цьому критичні напруження загальної втрати стійкості стрингера можна збільшити лише шляхом зменшення вільної довжини стрингера, тобто збільшення кількості шпангоутів, а отже, і їх ваги. Таким чином, при збільшенні коефіцієнта  $\psi$  зменшується вага обшивки та стрингерів, але збільшується вага шпангоутів.

## 2. ПРОЄКТУВАННЯ БЕЗСТРИНГЕРНОГО ВІДСІКУ

У безстрингерному відсіку єдиним невідомим параметром силової схеми є товщина обшивки  $\delta_0$ , що визначається умовою міцності обшивки безстрингерного відсіку при стисканні

$$\sigma(p = p^e) \leq \sigma_{кр}, \quad (3)$$

яка в цьому випадку перетворюється на проектну умову вигляду

$$\frac{N^e f}{2\pi R \delta_0} = \sigma_{кр.цил}, \quad (4)$$

де  $f$  – коефіцієнт безпеки (береться  $f = 1,3$ );

$\sigma_{кр.цил}$  – критичне напруження стиснутої обшивки безстрингерного відсіку.

Для того щоб вирішити питання про те, якою формулою користуватися для визначення критичного напруження стиснутої циліндричної оболонки, необхідно знайти граничне за плинністю значення осьової сили, тобто таке значення  $N$ , при якому в правильно спроектованому безстрингерному відсіку реалізуються критичні напруження, що дорівнюють границі плинності:

$$N^* = 2\pi R^2 \sigma_T \left( \frac{\sigma_T}{1,79E} \right)^{0,7273}. \quad (5)$$

Якщо розрахункова величина діючої сили  $N^p$  є меншою від  $N^*$ , то пропонується застосовувати формулу, що є правильною при лінійному



деформуванні:

$$\sigma_{кр.цил} = \frac{1,79E}{(R/\delta_0)^{1,375}}. \quad (6)$$

Підстановка формули (6) у рівняння (4) дає змогу визначити з нього величину  $\lambda = (R/\delta_0)$  – гнучкість циліндричної оболонки:

$$\lambda_{номр}^{np} = \left( \frac{11,427R^2E}{N^p} \right)^{0,421}. \quad (7)$$

Ця величина гнучкості є потрібною для сприйняття сили  $N^p$ . Товщину обшивки безстрингерного відсіку можна знайти за формулою

$$\delta_0 = (R/\lambda_{номр}). \quad (8)$$

Якщо розрахункова величина діючої сили є більшою за  $N^*$ , то слід застосовувати формулу для критичних напружень при непружному деформуванні. Тут пропонується використати формулу

$$\sigma_{кр}^{nl} = \sigma_\alpha - \frac{\sigma_d - \sigma_T}{\lambda^*} \lambda, \quad (9)$$

де  $\sigma_d$  – границя міцності матеріалу під час стискання;

$\lambda^*$  – граничне за плинністю значення гнучкості, тобто така гнучкість, при якій критичне напруження дорівнює границі плинності. Якщо для критичних напружень використовується формула (6), то

$$\lambda^* = \left( \frac{1,79E}{\sigma_T} \right)^{0,7273}. \quad (10)$$

Підставивши формулу (9) у рівняння (4), отримаємо

$$\lambda_{номр}^{nl} = \left( \frac{N^p}{2\pi R^2 \sigma_d} + \frac{\sigma_d - \sigma_T}{\sigma_d \lambda^*} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Після цього величина  $\delta_0$  визначається формулою (8).

Для перевірки правильності проведених обчислень слід визначити

критичні напруження  $\sigma_{цил}^0$  спроектованого безстрингерного відсіку (формули (6) і (9)), а потім – руйнівне навантаження

$$N_{руйн}^0 = 2\pi R\delta_0\sigma_{цил}^0.$$

Ця величина має відрізнятися від  $N^P$  не більш ніж на 0,1 %.

Крім умови міцності за стійкістю, що описується нерівністю (3), для обшивки безстрингерного відсіку має виконуватися також умова міцності за плинністю

$$\sigma(p = p^e) \leq \sigma_T. \quad (12)$$

Якщо для знайденого  $\delta_0$  ця умова не виконується, то потрібно знайти нову товщину обшивки за формулою

$$\delta_0 = \frac{N^e}{2\pi R\sigma_T} \quad (13)$$

і в подальших розрахунках використовувати це значення.

Обчислюється погонна вага безстрингерного відсіку  $\bar{G}_0$ , кг/см:

$$\bar{G}_0 = 2\pi R\delta_0\rho, \quad (14)$$

яка буде використовуватися для порівняння з вагою стрингерного відсіку.

### 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ОБШИВКИ СТРИНГЕРНОГО ВІДСІКУ

Товщину обшивки проєктованого відсіку визначають за заданим коефіцієнтом  $\varepsilon$  і визначеною в розд. 2 товщиною безстрингерного відсіку  $\delta_0$ :

$$\delta = \varepsilon\delta_0. \quad (15)$$

Допускається округлення отриманої величини  $\delta$  до двох значущих цифр. При цьому необхідно обчислити нове значення  $\varepsilon$ , таке, щоб виконувалася рівність (15).

#### 4. ВИБІР ЗНАЧЕНЬ ВАРІЙОВАНОГО ПАРАМЕТРА

Для дослідження впливу коефіцієнта  $\psi$  на вагову досконалість відсіку необхідно вибрати чотири значення  $\psi$ , для кожного з них провести повний проєктувальний розрахунок і визначити чотири значення погонної ваги, що в подальшому дасть змогу знайти оптимальний розв'язок за виглядом графіка  $\bar{G}(\psi)$ .

Для того щоб стрингерний відсік був легшим за безстрингерний, необхідно (але, звичайно, недостатньо, оскільки при цьому враховуються шпангоути), щоб погонна вага стрингерного перерізу без урахування шпангоутів була меншою за погонну вагу безстрингерного відсіку. З формули (2) видно, що площа стрингерного відсіку зв'язана з площею безстрингерного відсіку співвідношенням

$$F_{пер} = 2\pi R\delta_0 \frac{\delta}{\psi}. \quad (16)$$

Звідси випливає, що при  $\psi \leq \varepsilon$  стрингерний відсік є важчим від безстрингерного, і таке співвідношення між  $\psi$  і  $\varepsilon$  є нерациональним. Тому доцільно як  $\psi_{\min}$  взяти величину  $\delta$ :

$$\psi_{\min} = \varepsilon. \quad (17)$$

Верхня межа інтервалу  $\psi$  визначається з умови, щоб у проєктованому за заданим коефіцієнтом  $\psi$  відсіку величина потрібних критичних напружень стрингера (див. розд. 9, формули (34) і (35)) не перевищувала межі міцності матеріалу. Виявляється, що  $\psi_{\max}$  залежить від параметра

$$k = \frac{2\pi R\delta\sigma g}{N^e}. \quad (18)$$

Зв'язок між  $k$  і  $\psi_{\max}$  при  $f = 1,3$  можна подати у вигляді такої таблиці:

$k$	$\psi_{\max}$	$k$	$\psi_{\max}$	$k$	$\psi_{\max}$
0	0	0,6	0,4307	1,2	0,7837
0,1	0,0761	0,7	0,4961	1,3	0,8326
0,2	0,1504	0,8	0,5582	1,4	0,8797
0,3	0,2234	0,9	0,6186	1,5	0,9241
0,4	0,2948	1,0	0,6762	1,6	0,9651
0,5	0,3636	1,1	0,7310	1,69	1,00

Для значення  $k$ , обчисленого за формулою (18), параметр  $\psi_{\max}$  можна визначити за цією таблицею шляхом інтерполяції. Якщо  $k > 1,69$ , то слід брати  $\psi_{\max} = 1$ . Таблиця є результатом розв'язання рівняння

$$k(1 - \psi) + \psi(\sqrt{k\psi} - f) = 0 \quad (19)$$

при коефіцієнті безпеки  $f = 1,3$ .

Крім того, коефіцієнт  $\psi$  не має бути таким великим, щоб в обшивці при експлуатаційному навантаженні виникли напруження, більші за границю плинності. Отже, має виконуватися умова

$$\frac{\psi N^e}{2\pi R\delta} \leq \sigma_T, \quad (20)$$

з якої випливає, що

$$\psi'_{\max} = \frac{2\pi R\delta\sigma_T}{N^e}. \quad (21)$$

Якщо ця величина є меншою від величини знайденої за таблицею, то потрібно взяти

$$\psi_{\max} = \psi'_{\max}. \quad (22)$$

Найбільше можливе значення коефіцієнта  $\psi$  обмежується також і тим, що чим потужнішою є обшивка, тим слабкішими виявляються стрингери, які

підбираються за наведеною далі методикою, і може скластися така ситуація, коли жорсткість цих стрингерів буде недостатньою для підтримки обшивки від втрати стійкості. Відповідне граничне значення  $\psi$ , проте, важко визначити аналітично, і якщо воно є меншим, ніж вибране, то це виявляється вже під час розрахунку (див. розд. 2).

Для дослідження характеру залежності  $\bar{G}(\psi)$  беруть чотири значення  $\psi$ :

$$\psi_i = \psi_{\min} + i\Delta\psi \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (23)$$

де

$$\Delta\psi = 0,2(\psi_{\max} - \psi_{\min}). \quad (24)$$

Значення  $\psi_i$ , отримані за формулою (23), можна округлювати до двох значущих цифр, оскільки збереження постійного кроку за  $\psi$  не є обов'язковим.

Подальший розрахунок зручно вести у вигляді таблиці, кількість стовпців якої визначається кількістю розглянутих значень  $\psi$  (тобто п'ять; чотири знайдених і п'яте – яке відповідає мінімуму  $\bar{G}(\psi)$ ), а кількість рядків – це кількість параметрів, що визначаються для кожного значення  $\psi$ . Обчислення, описані в наступних розділах, виконуються паралельно для чотирьох значень  $\psi$ .

## 5. ПОТРІБНА ВЕЛИЧИНА КРИТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ОБШИВКИ

Для визначення потрібних критичних напружень обшивки слід розглянути напружений стан відсіку під час експлуатаційного навантаження. Стискальна сила  $N^e$  розподіляється між обшивкою і стрингерами пропорційно їх площам, тобто відповідно до коефіцієнта  $\psi$ . Стискальні напруження, що діють в обшивці, визначаються формулою

$$\sigma_0 = \frac{\psi N^e}{2\pi R\delta}. \quad (25)$$

Для того щоб виконувалася перша з умов міцності відсіку (див. розд. 1)

критичні напруження обшивки мають бути не менше, ніж  $\sigma_0$ . Таким чином, величина, яку визначають за формулою (25), є необхідним критичним напруженням обшивки.

## 6. ВІДСТАНЬ МІЖ СТРИНГЕРАМИ

Відстань між стрингерами визначається при умові, що фактичне критичне напруження стиснутої обшивки, яке визначається з урахуванням підтримувального впливу стрингерів, дорівнює потрібному напруженню  $\sigma_0$ .

Для визначення критичного напруження обшивки стрингерного відсіку (тобто критичного напруження оребреної циліндричної оболонки) застосовується формула

$$\sigma_{кр.обш} = \sigma_{цил} + \Delta\sigma, \quad (26)$$

де  $\sigma_{цил}$  – критичне напруження гладкої циліндричної оболонки (визначається за формулою (6) або (9) із заміною  $\delta_0$  на  $\delta$ );  $\Delta\sigma$  – додаток до величини критичного напруження обшивки, обумовлений підкріплювальною дією стрингерів. Величина цього додатка залежить від згинальної жорсткості  $JE$  стрингерів.

При малій згинальній жорсткості стрингери згинаються разом з обшивкою при її випинанні, і обчислення  $\Delta\sigma$  є досить складним завданням. Однак у разі досить великої згинальної жорсткості стрингерів ( $JE \geq JE^*$ ) випинання обшивки при втраті стійкості відбувається так, що стрингери (і волокна обшивки над стрингерами) не згинаються. У цьому випадку припиняється вплив подальшого збільшення  $JE$  на  $\Delta\sigma$ ; величину  $\Delta\sigma$  можна приблизно обчислювати за формулою

$$\Delta\sigma = \frac{3,6E}{(b/\delta)^2}. \quad (27)$$

Як впливає з цієї формули, можна підвищувати критичні напруження

обшивки збільшенням величини  $\delta$  – відстані між стрингерами, тобто збільшуючи кількість стрингерів.

Таким чином, відстань між стрингерами визначають з рівняння

$$\sigma_{цил} + \Delta\sigma = \sigma_0, \quad (28)$$

а при пружному деформуванні з урахуванням формули (27) використовують вираз

$$b = \delta \sqrt{\frac{3,6E}{\sigma_0 - \sigma_{цил}}}. \quad (29)$$

## 7. КІЛЬКІСТЬ СТРИНГЕРІВ

Кількість стрингерів  $n$  визначається як найменше ціле число, більше за відношення  $2\pi R / b$ .

## 8. ПЛОЩА ПЕРЕРІЗУ СТРИНГЕРА

Сумарна площа всіх стрингерів  $nf_c$  визначається через коефіцієнт  $\psi$  з формули (2), якщо вважати, що  $F_{пер} = 2\pi R\delta + nf_c$ :

$$f_c = \frac{2\pi R\delta(1-\psi)}{n\psi}. \quad (30)$$

## 9. ПОТРІБНА ВЕЛИЧИНА КРИТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ СТРИНГЕРА

Для визначення потрібних критичних напружень стрингера слід розглянути напружений стан відсіку під час розрахункового навантаження. Для того щоб задовольнялася друга з двох умов міцності відсіку, наведених у розд. 1, необхідно, щоб несна здатність відсіку  $N_{руйн}$  була не меншою, ніж діюче

розрахункове навантаження  $N^P$ . Прирівнявши несну здатність відсіку й величину розрахункового навантаження, отримаємо рівняння для визначення потрібного критичного напруження стрингерів  $\sigma_c$ :

$$N_{руїн} = \sigma_c n (f_c + 2c\delta) = N^P, \quad (31)$$

де

$$2c = b \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_c}}. \quad (32)$$

Рівняння (31) з урахуванням залежності (32) є нелінійним рівнянням відносно  $\sigma_c$ . Тут зручно ввести позначення

$$z = \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_0}} \quad (33)$$

і розв'язувати рівняння (31) відносно  $z$ . Отже, маємо

$$z = \sqrt{\frac{\psi}{1-\psi} + \frac{1}{4} \left( \frac{\psi}{1-\psi} \right)^2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\psi}{1-\psi} \right). \quad (34)$$

Обчисливши  $z$ , знайдемо

$$\sigma_c = z^2 \sigma_0. \quad (35)$$

Природно, що ця величина не має бути більшою за границю міцності при стисканні, оскільки таке напруження реалізувати неможливо. Якщо в (34) підставити  $z^2 = (\sigma_d / \sigma_0)$ , то отримаємо вираз (19) для визначення величини  $\psi_{\max}$ .

## 10. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРМИ ПЕРЕРІЗУ СТРИНГЕРА

Типи профілів, які розглядаються в цьому завданні, є такими, що повністю визначаються двома параметрами –  $H$  і  $S$ . Для визначення цих параметрів слід використовувати дві умови:

- 1) площа перерізу стрингера, виражена через параметри  $H$  і  $S$ , дорівнює



$f_c$  (див. розд. 8);

2) дійсне (наявне) критичне напруження місцевої втрати стійкості стрингера, яке визначається механічними характеристиками матеріалу та геометрією, дорівнює значенню  $\sigma_c$  (див. розд. 9), потрібному для сприйняття заданої сили  $N^P$ . Наприклад, якщо профіль стрингера – рівнобокий кутик, то площа його визначається формулою

$$f_c = 2HS \quad (a)$$

(літерами позначено формули, які є правильними для рівнобокого кутика). Вибір формули для визначення критичних напружень місцевої втрати стійкості залежить від потрібних критичних напружень. При  $\sigma_c \leq \sigma_T$  для полиць кутика

$$\sigma_{кр.місц} = \frac{0,9k_\sigma E}{(H/S)^2}, \quad (36)$$

де  $k_\sigma = 0,45$  (грань з вільним краєм).

Позначивши гнучкість полиці кутика через

$$\lambda_c = (H/S), \quad (б)$$

з формули (36) знайдемо потрібну гнучкість кутика

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{0,405E}{\sigma_c}}. \quad (в)$$

Потім, виразивши  $H$  через  $S$  і  $\lambda_c$  у формулі (б), знайдемо  $S$ :

$$S = \sqrt{\frac{f_c}{2\lambda_c}}. \quad (г)$$

Якщо величина  $\sigma_c$  є більшою від границі плинності, то критичні напруження можна виразити через параметри стрингера:

$$\sigma_{кр}^{nl} = \sigma_d \frac{1+\nu}{1+\nu+\alpha^2\nu^2}. \quad (37)$$

У цій формулі  $\alpha^2$  – зведена механічна характеристика матеріалу:

$$\alpha^2 = \frac{\sigma_d^2 - \sigma_T^2}{\sigma_d^2}, \quad (38)$$

а  $\nu$  – відношення границі міцності матеріалу при стисканні ( $\sigma_d$ ) до умовного (ейлерового) критичного напруження  $\sigma^e$ , знайденого за формулою (36):

$$\nu = \frac{\sigma_d}{\sigma^e}. \quad (39)$$

Таким чином, при  $\sigma_c > \sigma_T$  шукана гнучкість  $\lambda_c$  входить у величину  $\sigma^e$ . Для її визначення зручно спочатку з рівняння (37) знайти потрібну величину

$$\nu_n = \frac{m}{2} + \sqrt{\left(\frac{m}{2}\right)^2 + m}, \quad (40)$$

де

$$m = \frac{\sigma_d - \sigma_c}{\alpha^2 \sigma_c}.$$

Знаючи потрібну величину  $\nu_n$ , знайдемо потрібну величину  $\sigma_n^e$ , а потім, підставивши в праву частину (36) замість  $\sigma_c$  величину  $\sigma_n^e$ , знайдемо значення  $\lambda_c$ , потрібне для того, щоб забезпечити збіг потрібного й фактичного значень критичних напружень стрингера.

## 11. КОНТРОЛЬ ЗГИНАЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ СТРИНГЕРА

Для того щоб стрингер дійсно забезпечував те підвищення критичних напружень обшивки, яке бралось у формулі (27), необхідно, щоб його згинальна жорсткість задовольняла умову

$$(JE)_{стр} \geq (JE)^*, \quad (41)$$

де  $(JE)^*$  – найменше значення згинальної жорсткості, при якому стрингер залишається прямим після випинання обшивки через втрату стійкості. Для

визначення величини  $(JE)^*$  пропонується наближена формула

$$(JE)^* = 2bE\delta^3 \left( 1 + \frac{b^2}{20R\delta} \right). \quad (42)$$

Момент інерції стрингера, що входить у ліву частину умови (41), необхідно обчислювати відносно центральної осі перерізу стрингера, паралельної до обшивки (оскільки для стрингера напрямок випинання може бути перпендикулярним до обшивки).

Якщо умова (41) порушується, то це свідчить про неможливість раціонально спроектувати переріз для кожного коефіцієнта  $\psi$  (коефіцієнт  $\psi$  є занадто великим). У цьому випадку потрібно провести розрахунок для іншого, меншого значення  $\psi$ .

## 12. ВІДСТАНЬ МІЖ ШПАНГОУТАМИ

Відстань між шпангоутами визначається з умови рівності критичних напружень, що відповідають місцевій і загальній формам втрати стійкості стрингера. Підібрана раніше гнучкість полиць і стінок стрингера забезпечує рівність  $\sigma_{кр.місц} = \sigma_c$ . Критичне напруження загальної втрати стійкості стрингера, який опирається на шпангоут, залежить від згинальної жорсткості шпангоута. Якщо шпангоут має малу згинальну жорсткість, то він втягується стрингерами у місця випинання при втраті стійкості. У цьому випадку визначити критичне навантаження досить складно. Але, якщо згинальна жорсткість шпангоутів стає більшою за деяку граничну величину  $(JE)^{**}$ , то при втраті стійкості стрингерів реалізується така форма їх випинання, що перерізи стрингерів, які знаходяться в площині шпангоутів, не випинаються. У цьому випадку критичні напруження стрингера можна знайти приблизно за формулою (при лінійному деформуванні)

$$\sigma_{кр.вип} = \frac{\pi^2 (JE)_{cmp}}{a^2 f_c} \quad (43)$$

(наближеність цієї формули пояснюється тим, що обшивка враховується тільки як в'язь, яка запобігає зміщенню перерізів стрингера в напрямку, паралельному до дотичної обшивки).

З формули (43) при  $\sigma_c \leq \sigma_T$  можна знайти відстань між шпангоутами

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2 (JE)_{cmp}}{\sigma_c f_c}}. \quad (44)$$

Якщо  $\sigma_c > \sigma_T$ , то у формулу (44) замість  $\sigma_c$  потрібно підставити величину  $\sigma_n^e$ , знайдену в розд. 10.

### 13. ПЛОЩА ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ШПАНГОУТА

Переріз шпангоута підбирають з умови, що його згинальна жорсткість має бути настільки великою, щоб при визначенні критичних напружень загальної втрати стійкості стрингерів можна було б як довжину розглядати відстань між шпангоутами й користуватися формулою (43).

Для визначення граничної згинальної жорсткості шпангоута пропонується наближена формула

$$(JE)^{**} = 1,7 (JE)_{cmp} (R/a)^3. \quad (45)$$

Для отримання однозначної залежності між площею й моментом інерції перерізу шпангоута в цьому завданні пропонується використовувати припущення про геометричну подібність перерізів стрингера та шпангоута. Якщо всі лінійні розміри перерізу шпангоута в  $\beta$  разів є більшими за відповідні розміри перерізу стрингера, то  $J_{шп} = \beta^4 J_{cmp}$ . Підстановка цієї рівності в (45) дає змогу знайти масштаб

$$\beta = \sqrt[4]{1,7(R/a)^3}. \quad (46)$$

Після цього площа шпангоута визначається формулою

$$F = \beta^2 f_c. \quad (47)$$

#### 14. ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ

За параметрами відсіку, знайденими в попередніх пунктах алгоритму, можна побудувати графік залежності  $\bar{G}(\psi)$  (див. формулу (1)). За цим графіком слід приблизно визначити оптимальне значення  $\psi_{opt}$ , якому відповідає мінімум досліджуваної функції. Нанести на цьому графіку пунктиром горизонтальну пряму  $\bar{G} = \bar{G}_0$  (див. розд. 2). Для знайденого значення  $\psi_{opt}$  виконати обчислення, описані в розд. 5–14, для визначення оптимальних (при заданому значенні  $\varepsilon$ ) параметрів стрингерного відсіку.

## УКАЗІВКИ З ОФОРМЛЕННЯ ЗАВДАННЯ

1. Завдання виконують на аркушах паперу формату А4 (210 x 297).
2. Титульний аркуш оформляють згідно з дод. 1.
3. Усі листи, таблиці, рисунки обов'язково нумерують наскрізно.
4. Етапи розрахунку мають починатися заголовками, перелік яких виносять до обов'язкового розділу "Зміст".

5. На графіках чітко вказують параметри, величини яких відкладаються по осях абсцис та ординат, і відповідні масштаби (відносно 1 мм довжини).

6. Усі обчислення за формулами виконують відповідно до правила трьох кроків:

- а) спочатку записують формулу для обчислення певної величини;
- б) потім підставляють числові значення всіх параметрів, що входять до правої частини формули;
- в) записують результат розрахунку із обов'язковим зазначенням одиниць вимірювання.

Не рекомендується ускладнювати розрахункову формулу, замінюючи параметри в її правій частині виразами, за якими їх можна обчислити. Ці допоміжні обчислення слід виконувати окремо.

7. Основні результати, отримані під час розрахунків, наводять у кінці записки на окремому аркуші під заголовком "Основні результати".

У завданні "Проектувальний розрахунок стиснутого стрингерного відсіку" (дод.2) на цьому аркуші для умови  $\psi = \psi_{onm}$  наводять:

а) креслення ділянки перерізу, що складається з трьох стрингерів (масштаб вибирають так, щоб довжина відрізка, який зображує відстань між стрингерами, приблизно дорівнювала 7 см);

б) на цьому кресленні вказують марку матеріалу й такі параметри:  
 $E, \sigma_T, \sigma_b, \sigma_d; N^e, R, f, \text{int}; \varepsilon, \psi_{onm}, \psi_{\max}; \bar{G}_0, \bar{G}_{\min}.$

**ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО АРКУША**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського**

**«Харківський авіаційний інститут»**

**Кафедра міцності літальних апаратів**

**ЗАВДАННЯ № \_\_\_\_\_**

з дисципліни \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Тема \_\_\_\_\_

Виконав студент \_\_\_\_\_ групи

\_\_\_\_\_

Консультант \_\_\_\_\_

ПБ

Дата здачі на перевірку \_\_\_\_\_

Перевірив (дата, підпис викладача) \_\_\_\_\_

Дата здачі після виправлень \_\_\_\_\_

Прийнято (дата) з оцінкою \_\_\_\_\_; викладач \_\_\_\_\_

Харків 2023

**ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАЛЬНОГО  
РОЗРАХУНКУ СТИСНУТОГО ВІДСІКУ  
КОРПУСУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

Вихідні дані:  $R = 0,35$  м; матеріал – Д16Т з такими характеристиками:  
 $\sigma_T = 300$  МПа;  $N^c = -1000$  кН;  $E = 72000$  МПа;  $\sigma_d = \sigma_B = 450$  МПа;  
 $\varepsilon = 0,163$ ;  $f = 1,3$ ;  $\lambda_0 = \frac{R}{\delta}$ .

1. Визначаємо параметр товщини обшивки безстрингерного відсіку  $\delta_0$ :

$$N^* = 2\pi R^2 \sigma_T \left( \frac{\sigma_T}{1,79E} \right)^{0,7273} =$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 0,35^2 \cdot 300 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{300 \cdot 10^6}{1,79 \cdot 72000 \cdot 10^6} \right)^{0,7273} =$$

$$= 6,28 \cdot 0,1225 \cdot 300 \cdot 10^6 \cdot 0,0128 = 2,81 \cdot 10^6 \text{ Н} \approx 2810 \text{ кН};$$

$$N^P = 1000f = 1300 \text{ кН}; \quad N^P < N^* - \text{мінімальне деформування.}$$

Тоді

$$\lambda_{\text{потр}}^{\text{пр}} = \left( \frac{11,247R^2E}{N^P} \right)^{0,421} = \left( \frac{11,247 \cdot 0,35^2 \cdot 72000 \cdot 10^6}{1300 \cdot 10^3} \right)^{0,421} = 114;$$

$$\delta_0 = \frac{R}{\lambda_0} = \frac{0,35}{114} = 3,07 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,07 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\text{кр.0}}^{\text{шил}} = \frac{1,79E}{\lambda^{1,375}} = 191 \text{ МПа}; \quad \bar{\sigma}_{\text{с.0}} = 2\pi R \delta_0 = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$\bar{\sigma}_0 = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Перевірка:

$$N_{\text{розр}}^0 = 2\pi R \delta_0 \sigma_{\text{кр.0}}^{\text{шил}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3,07 \cdot 10^{-3} \cdot 0,35 \cdot 191 \cdot 10^6 =$$

$$= 1290 \text{ кН} \rightarrow (0,8 \%).$$

2. Визначаємо товщину обшивки стрингерного відсіку:

$$\delta_{\text{стр}} = \delta = \delta_0 \cdot 0,163 = 3,07 \cdot 0,163 = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \text{ отже,}$$

$$\delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

3. Визначаємо значення для варійованого параметра:

$$\Psi_{\text{max}}^{\text{л}} \rightarrow k = \frac{2\pi R \delta \sigma_d}{N^c} = \frac{6,28 \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \cdot 10^6}{1000 \cdot 10^3} = 0,495.$$

З таблиці при  $k = 0,495 \approx 0,5$  маємо  $\Psi_{\text{max}(2)}^{\text{л}} = 0,3636$ .



$$\text{Визначимо } \Psi_{\max(1)}^{\perp} = \frac{2\pi R \delta \sigma_T}{N^e} = \frac{6,28 \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \cdot 10^6}{1000} = 0,326;$$

$$\Psi_{\max}^{\perp} = \min \begin{cases} \Psi_{\max(1)}^{\perp} = 0,326. \\ \Psi_{\max(2)}^{\perp} \end{cases}$$

4. Визначаємо чотири значення для коефіцієнта  $\Psi_i$ :

$$\Psi_i = \Psi_{\min} + i \Delta \Psi^{\perp}; \quad \Delta \Psi = 0,2(\Psi_{\max} - \Psi_{\min}); \quad \Psi_{\min} = 0,163;$$

$$\Psi_{\max} = 0,326;$$

$$\Delta \Psi = 0,0326; \quad \Psi_i = 0,163 + 0,0326i \quad (\text{округляємо до двох знаків}).$$

5. Визначаємо діюче в обшивці стискальне напруження:

$$\sigma_0 = \frac{\Psi N^e}{2\pi R \delta} = \frac{1000 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} \Psi = (9,1 \cdot 10^8) \Psi = 910 \Psi \text{ МПа.}$$

6. Визначаємо критичне напруження гладкої циліндричної оболонки:

$$\sigma_{\text{цил}} = \frac{1,79E}{\lambda^{1,375}}; \quad \lambda = \frac{R}{\delta} = \frac{0,35}{5 \cdot 10^{-4}} = 700; \quad \sigma_{\text{цил}} = \frac{1,79 \cdot 72000}{700^{1,375}} = 15,8 \text{ МПа;}$$

$$b = \delta \sqrt{\frac{3,6E}{\sigma_0 - \sigma_{\text{цил}}}} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{3,6 \cdot 72000}{\sigma_0 - 15,8}} = \frac{0,255}{\sqrt{\sigma_0 - 15,8}} = \Psi = 0,2;$$

$$b = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{3,6 \cdot 72000}{182 - 15,8}} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{3,6 \cdot 72000}{166}} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{1,56 \cdot 10^3}.$$

7. Визначаємо кількість стрингерів, площу перерізу й коефіцієнт  $z$ :

$$n = \frac{2\pi R}{b} = \frac{6,28 \cdot 0,35}{6} = \frac{2,2}{6};$$

$$f_c = \frac{2\pi R \delta}{n} \cdot \frac{1 - \Psi}{\Psi} = \frac{6,28 \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{n} \cdot \frac{1 - \Psi}{\Psi};$$

$$z = \sqrt{\frac{1,3}{1 - \Psi} + \frac{1}{4} \left( \frac{\Psi}{1 - \Psi} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \Psi}{\Psi}};$$

$$\sigma_c = z^2 \sigma_0.$$

8. Зробимо переобчислення для випадку, якщо  $\sigma > \sigma_T$ :

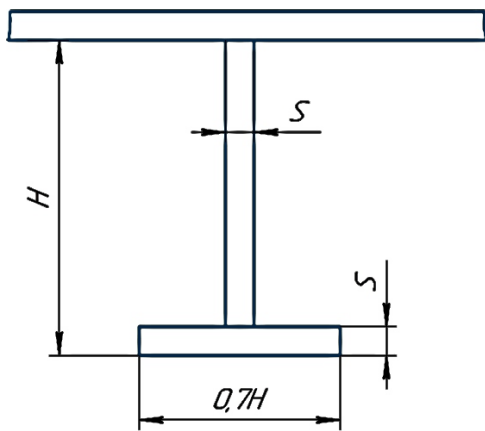
$$\alpha^2 = \frac{\sigma_d^2 - \sigma_T^2}{\sigma_d^2} = \frac{450^2 - 300^2}{450^2} = 0,556;$$

$$m = \frac{\sigma_d - \sigma_c}{\alpha^2 \sigma_c} = \frac{450 - \sigma_c}{0,556 \sigma_c};$$

$$v = \frac{m}{2} + \sqrt{\left(\frac{m}{2}\right)^2 + m};$$

$$\sigma_c^e = \frac{\sigma_d}{v}.$$

9. Визначаємо висоту  $H$  і товщину  $S$  стрингера:



$$\sigma_{кр}^{пол} = \frac{0,45 \cdot 0,9E}{\left(\frac{0,35H}{S}\right)^2} = \frac{0,405E}{0,1225 \left(\frac{H}{S}\right)^2} = \frac{3,31E}{\left(\frac{H}{S}\right)^2};$$

$$\sigma_{кр}^{стін} = \frac{0,9 \cdot 4E}{\left(\frac{H}{S}\right)^2} = \frac{3,6E}{\left(\frac{H}{S}\right)^2}.$$

Визначальним є  $\sigma_{кр}^{пол} = \frac{3,31E}{\left(\frac{H}{S}\right)^2}$ .

Маємо:

$$f_c = 1,7 \frac{HSH}{H} = \frac{H^2}{\lambda} \cdot 1,7, \text{ звідки } H = \sqrt{\frac{f_c \lambda}{1,7}};$$

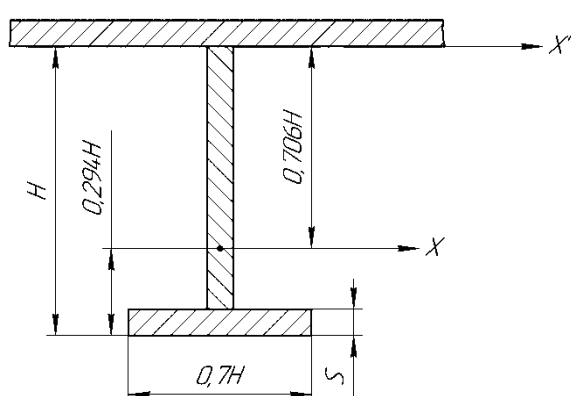
$$\frac{H}{S} = \lambda; \quad \sigma_c^e = \frac{3,31E}{\lambda^2}; \quad \lambda = \sqrt[2]{\frac{3,31E}{\sigma_c^e}}; \quad H = \sqrt[2]{\frac{\lambda f_c}{1,7}}; \quad S = \frac{H}{\lambda};$$

$$\lambda = \sqrt[2]{\frac{3,31 \cdot 72000}{\sigma_c^e}} = \frac{4,882 \cdot 10^2}{\sqrt{\sigma_c^e}}.$$

Перевірка для випадку, якщо  $\Psi = 0,2$ :

$$\sigma_{кр.стр} = \frac{0,405 \cdot 72000}{\left(\frac{0,7}{2} \cdot \frac{2,07 \cdot 10^{-2}}{0,661 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 242,7 \text{ МПа} = \sigma_c.$$

10. Визначаємо жорсткість стрингера:



$$Y_{ц.т.} = \frac{S_{x'}}{F} = \left( \frac{HSH}{2} + 0,7HSH \right) \frac{1}{1,7HS} =$$

$$= (0,5 + 0,7) \frac{H^2S}{1,7HS};$$

$$Y_{ц.т.} = \frac{1,2}{1,7}H = 0,706H;$$

$$I_x = \frac{0,706^3SH^3}{3} + \frac{0,294^3}{3} + HS \cdot 0,294^2H^2 \cdot 0,7 =$$

$$= \left( \frac{0,706^3}{3} + \frac{0,294^3}{3} + 0,294^2 \cdot 0,7H^3 \right) S =$$

$$= (0,1173 + 0,008471 + 0,0605)H^3S;$$

$$EI = 72000 \cdot 10^6 \cdot 0,1863H^3S = 1,341 \cdot 10^{10}H^3S.$$

Оскільки відстань між шпангоутами

$$a = \sqrt{\frac{\pi^2(EI)_{стр}}{f_c \sigma_c^e}},$$

потрібну згинальну жорсткість стрингера визначаємо так:

$$(EI)_{стр}^* = 2bE\delta^3 \left( 1 + \frac{b^2}{20R\delta} \right) = 18b + 5143b^3,$$

де  $R = 0,35$  м;  $E = 72000$  МПа;  $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ .

11. Визначаємо площу потрібного перерізу шпангоута за формулою

$$F_{шп} = \beta^2 f_c,$$

де

$$\beta = \sqrt[4]{1,7 \frac{R^3}{a^3}} = \sqrt[4]{1,7 \frac{0,35^3}{a^3}} = \frac{0,5196}{a^{0,75}}.$$

12. Визначаємо зведену вагу безстрингерного відсіку при різних значеннях  $\Psi$  і заданому  $\varepsilon$ :

$$\delta_0 = 3,07 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{G}_0 = 2\pi R \delta_0 = 6,28 \cdot 0,35 \cdot 3,07 \cdot 10^{-3} = 6,748 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{G}_{\text{обш}} = 2\pi R\delta = 6,28 \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 1,099 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{G}_{\text{стр}} = n f_c;$$

$$\bar{G}_{\text{шп}} = 2\pi R F_{\text{шп}} \frac{1}{a} = 2,198 \frac{F_{\text{шп}}}{a};$$

$$\bar{G} = \bar{G}_{\text{обш}} + \bar{G}_{\text{стр}} + \bar{G}_{\text{шп}}.$$

13. Результати розрахунку подамо у вигляді табл. Д.2.1.

Таблиця Д.2.1

№ п/п	Параметр	Формула	Одиниця вимірювання	$\Psi_i$				
				0,2	0,23	0,26	0,28	0,32
1	$\sigma_0$	$\frac{\Psi N^e}{2\pi R\delta}$	МПа	182	209	237	255	291
2	b	$\frac{0,255}{\sqrt{\sigma_0 - 15,8}}$	м	0,0198	0,0183	0,0171	0,0165	0,0154
3	n	$\frac{2,2}{b}$	-	111	120	129	133	143
4	$\frac{1-\Psi}{\Psi n}$	$\frac{1-\Psi}{\Psi n}$	-	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$
5	$Y_c$	$1,1 \cdot 10^{-3} \frac{1-\Psi}{\Psi n}$	м <sup>2</sup>	$3,96 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	$2,43 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$1,63 \cdot 10^{-5}$
6	$\frac{\Psi}{1-\Psi}$	$\frac{\Psi}{1-\Psi}$	-	0,25	0,299	0,351	0,389	0,471
7	$z^2$	$\left(\frac{\Psi}{1-\Psi}\right)^2$	-	0,0625	0,0892	0,123	0,151	0,221
8	z	$z = \sqrt{\frac{\Psi}{1-\Psi} + \frac{1}{4}\left(\frac{\Psi}{1-\Psi}\right)^2} - \frac{1}{2}\left(\frac{\Psi}{1-\Psi}\right)$	-	1,156	1,158	1,161	1,163	1,167
9	$\sigma_c$	$z^2 \sigma_0$	МПа	243,2	280,3	319,5	344,9	396,3
10	m	$\frac{450 - \sigma_c}{0,556 \sigma_c}$	-	-	-	0,375	0,548	0,244
11	v	$\frac{m}{2} + \sqrt{\left(\frac{m}{2}\right)^2 + m}$	-	-	-	1,3	1,063	0,631
12	$\sigma_c^e$	$\frac{\sigma_d}{v}$	МПа	243,2	280,3	346,2	423,3	713,2

Закінчення табл. Д.2.1

№ п/п	Параметр	Формула	Одиниця вимірювання	$\Psi_i$				
				0,2	0,23	0,26	0,28	0,32
13	$\lambda$	$\frac{4,882 \cdot 10^2}{\sqrt{\sigma_c^e}}$	-	31,31	29,16	26,24	23,73	18,28
14	H	$\sqrt[2]{\frac{\lambda f_c}{1,7}}$	м	$2,701 \cdot 10^{-2}$	$2,295 \cdot 10^{-2}$	$1,937 \cdot 10^{-2}$	$1,724 \cdot 10^{-2}$	$1,324 \cdot 10^{-2}$
15	S	$\frac{H}{\lambda}$	м	$8,624 \cdot 10^{-4}$	$7,87 \cdot 10^{-4}$	$7,381 \cdot 10^{-4}$	$7,266 \cdot 10^{-4}$	$7,242 \cdot 10^{-4}$
16	EI	$1,341 \cdot 10^{10} H^3 S$	H · м <sup>2</sup>	$2,279 \cdot 10^2$	$1,276 \cdot 10^2$	$7,193 \cdot 10^2$	$4,993 \cdot 10^2$	$2,254 \cdot 10^2$
17	a	$\sqrt{\frac{\pi^2 (EI)_{стр}}{f_c \sigma_c^e}}$	м	0,483	0,383	0,290	0,234	0,138
18	(EI)*	$18b + 5143b^3$	H · м <sup>2</sup>	0,396	0,361	0,333	0,32	0,296
19	$\beta$	$\frac{0,5196}{a^{0,75}}$	-	0,9	1,067	1,31	1,544	2,295
20	F	$\beta^2 f_c$	м <sup>2</sup>	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$3,495 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$5,078 \cdot 10^{-5}$	$8,585 \cdot 10^{-5}$
21	$\bar{G}_{стр}$	$nf_c$	м <sup>2</sup>	$4,396 \cdot 10^{-3}$	$3,684 \cdot 10^{-3}$	$3,135 \cdot 10^{-3}$	$2,833 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
22	$\bar{G}_{шп}$	$2,198 \frac{F_{шп}}{a}$	м <sup>2</sup>	$1,461 \cdot 10^{-4}$	$2,006 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$1,367 \cdot 10^{-4}$
23	$\bar{G}_{відс}$	$\bar{G}_{об} + \bar{G}_{стр} + \bar{G}_{шп}$	м <sup>2</sup>	$5,641 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,796 \cdot 10^{-3}$
24	2с	$b \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_c}}$	м	$1,713 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	$1,32 \cdot 10^{-2}$
25	$\bar{f}$	$n\sigma_c(f_c + 2с\delta)$	H	$1,299 \cdot 10^3$	-	-	-	$1,298 \cdot 10^3$

## БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

### *Основна література*

1. Чемерис, О. М. Будівельна механіка літаків та вертольотів : консп. лекцій / О. М. Чемерис. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 72 с.
2. Баженов, В. А. Будівельна механіка. Розрахункові вправи. Задачі. Комп'ютерне тестування : навч. посіб. / В. А. Баженов, Г. М. Іванченко, О. В. Шишов, С. О. Пискунов. – Київ : Каравела, 2013. – 440 с.
3. Образцов, И. Ф. Строительная механика летательных аппаратов : учеб. для авиац. вузов / И. Ф. Образцов. – М. : Высш. шк., 1986. – 536 с.
4. Дібір, О. Г. Будівельна механіка авіаційних конструкцій : навч. посіб. Ч. 2. Розрахунок тонкостінних стрижнів / О. Г. Дібір. – Харків : ХАІ, 2019. – 280 с.

### *Додаткова література*

5. Фигуровский, В. И. Расчет на прочность беспилотных летательных аппаратов / В. И. Фигуровский. – М. : Машиностроение, 1973. – 358 с.
6. Лебедев, А. А. Динамика полета / А. А. Лебедев, Л. С. Чернобровкин. – М. : Машиностроение, 1973. – 616 с.
7. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Постановка задачі.....	4
2. Проектування безстрингерного відсіку.....	7
3. Визначення товщини обшивки стрингерного відсіку.....	9
4. Вибір значень варійованого параметра.....	10
5. Потрібна величина критичних напружень обшивки.....	12
6. Відстань між стрингерами.....	13
7. Кількість стрингерів.....	14
8. Площа перерізу стрингера.....	14
9. Потрібна величина критичних напружень стрингера.....	14
10. Визначення параметрів форми перерізу стрингера.....	15
11. Контроль згинальної жорсткості стрингера.....	17
12. Відстань між шпангоутами.....	18
13. Площа поперечного перерізу шпангоута.....	19
14. Знаходження оптимального розв'язку.....	20
Указівки з оформлення завдання.....	21
Додаток 1. Зразок титульного аркуша.....	22
Додаток 2. Приклад виконання курсового проектувального розрахунку стиснутого відсіку корпусу літального апарата.....	23
Бібліографічний список .....	29

Методичне видання

**Мірошніков Віталій Юрійович**

**Савін Олександр Борисович**

**Соболь Володимир Миколайович**

**ПРОЄКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК СТИСНУТОГО ВІДСІКУ  
КОРПУСУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2023

Підписано до видання 09.10.2023

Ум. друк. арк. 1,7. Обл.-вид. арк. 1,94. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001