

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Газотурбінний двигун»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів

за темою №4 - Камери згоряння

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2022 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного
коледжу Харківського
національного університету
внутрішніх справ
Протокол від 22.08.2022 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2022 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 10.08.2022р. № 1

Розробники:

1. Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Царенко Андрій Олександрович

Рецензенти:

1. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.
2. Викладач циклової комісії аеронавігації КЛК ХНУВС, к.т.н., с.н.с. Тягній В.Г.

План лекції

1. Призначення і вимоги до камер згорання.
2. Типи камер згорання та їх порівняльна оцінка.
3. Сили, діючі на камеру згорання та викликаємі ними напруги.
4. Конструктивні елементи камери згорання.
5. Матеріали камер згорання.

Рекомендована література:

Основна:

1. Кулик М.С., Тамаргазін О.А. Конструкція, міцність та надійність газотурбінних установок і компресорів. Київ: НАУ, 2009. 477 с.
2. Терещенко Ю.М. Газотурбінні двигуни літальних апаратів, Київ: Вища школа, 2000. 319 с.
3. Іноземцев А.А., Сандрацький В.Л. Газотурбінні двигуни. П.: ВАТ «Авіадвигун», 2006. 1024 с.
4. Данилейко І.І., Капустін Л.Н., Фельдман Е.Л. Основи конструкції авіаційних двигунів. Москва: Транспорт, 1988. 296 с.

Додаткова:

5. Лозицький Л.П. Конструкція і міцність авіаційних газотурбінних двигунів. Москва: Повітряний транспорт, 1992. 536 с.
6. Нечаєв В.М. Авіаційні газотурбінні двигуни. Л.: Видавництво Академії цивільної авіації, 1973. 86 с.

Текст лекції

1. Призначення і вимоги до камер згорання.

Камера згорання - елемент ГТД, який служить для організації процесу згорання паливно-повітряної суміші. Камера згорання є дуже відповідальним елементом двигуна. Від її пристрою і здійснення процесу згорання залежать економічність двигуна, надійність роботи і тривалість експлуатації як самої камери згорання, так і двигуна.

Камера згорання повинна задовольняти наступним вимогам:

1. Обсяг камери згорання повинен забезпечувати можливо високу теплонапруженість, тобто камера повинна мати малий обсяг, що зменшує її розміри і вага. Під теплонапруженістю камери згорання розуміють кількість тепла, що виділяється одиниці об'єму (1 м³) камери протягом 1 години.

$$Q_V = \frac{Q}{V_{\text{ж}} P_{\text{к}}^*} = 3600 \frac{H_U G_T}{V_{\text{ж}} P_{\text{к}}^*} \eta_{\text{Г}}$$

де H_U - нижча теплотворна здатність палива (Дж/кг);

G_T - секундна витрата палива (кг/с);

$V_{\text{ж}}$ - обсяг жарової труби (м³);

$P_{\text{к}}^*$ - тиск повітря (Па).

Чим більше теплонапруженість при заданій витраті палива, тим менше об'єм КС. Теплонапруженість КС сучасних ГТД складає (3,5 ... 6,5) * 10⁶ (Дж/ч м³ Па).

1. Висока повнота згоряння палива на всіх режимах роботи двигуна. Повнота згоряння палива характеризується коефіцієнтом повноти згоряння η_{Γ} , під яким зазвичай розуміють відношення кількості тепла, що виділився при згоранні одиниці маси палива, до його теплотворної здатності. В сучасних камерах повнота згоряння досягає 97 - 98%.

2. Надійний розжиг палива в земних і висотних умовах. У земних умовах розжиг повинен бути забезпечений в діапазоні температур від мінус 40 ° до плюс 40 ° С. Повинен бути забезпечений розжиг палива в умовах високогірного аеродрому - до висоти 4,5 км. Висотність розпалу для цивільних літаків - 9 км.

4. Нагріті деталі камери згоряння повинні добре охолоджуватися, це забезпечує їх роботу тривалий час без дефектів (прогарів, жолоблення, тріщин і нагару від дії полум'я).

5. Мінімальні втрати повного тиску в КС. Втрати характеризуються коефіцієнтом відновлення повного тиску:

$$\sigma_{\text{КС}} = p_{\Gamma}^* / p_{\text{К}}^*$$

В сучасних КС коефіцієнт відновлення повного тиску становить 0,94 ... 0.96.

6. В камері повинно забезпечуватися стійке горіння суміші, тобто не повинно бути коливань, загасання і зривом полум'я при всіх режимах роботи двигуна.

7. Горіння повинно закінчуватися в жаровій трубі. Факел полум'я не повинен доходити до лопаток газової турбіни щоб уникнути перегріву і обгорання їх.

8. Температура газового потоку на виході з камери згоряння повинна бути однаковою по всьому перетину, щоб не вийшло місцевого обгорання або оплавлення соплових лопаток турбіни.

9. Рівень викидів диму (SN (Smoke number)), незгорілого палива і газоподібних речовин, що забруднюють атмосферу оксидів азоту (NOx), оксидів вуглецю (CO), незгорілих вуглеводнів (HC) - повинен відповідати міжнародним нормам ІКАО і Авіаційних правил.

10. Здатність працювати на різних паливах як вітчизняних, так і закордонних.

2. Типи камер згоряння та їх порівняльна оцінка.

Камери згоряння ГТД поділяють:

- *за напрямом потоку повітря та продуктів згоряння*: прямоточні та протиточні;

- *за способом подачі палива в зону згоряння*: з подачею палива в паровій фазі та з подачею палива в рідкій фазі;

- *по конструкції та компонованні на двигуні*: трубчасті, кільцеві та трубчасто-кільцеві.

Прямоточні камери (див. рис. 1, 4, 5) набули найбільшого поширення на сучасних газотурбінних двигунах. Переваги: малі гідравлічні втрати та діаметральний розмір. Недолік – збільшений осьовий розмір.

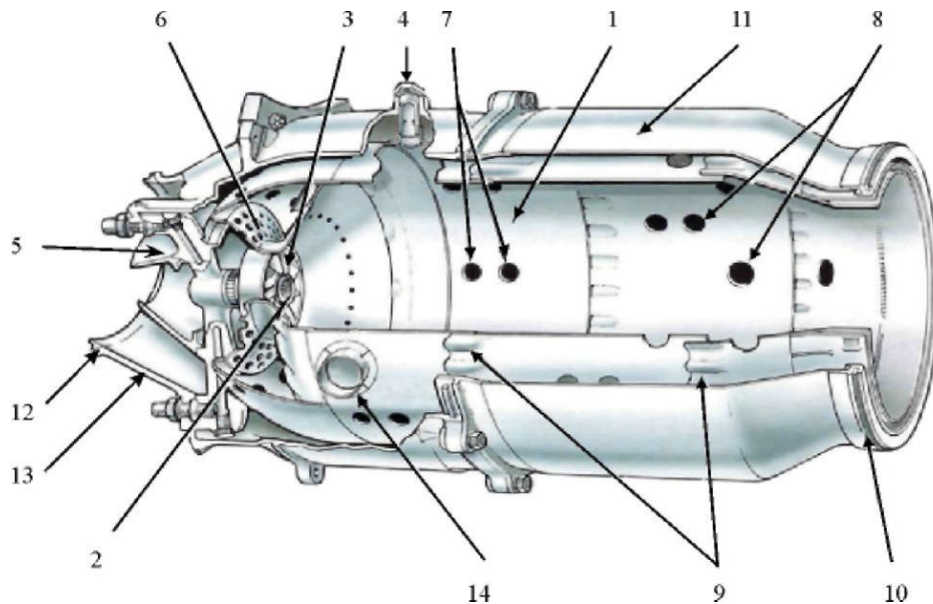


Рис.1 Індивідуальна трубчаста КС

1- жарова труба; 2 - форсунка; 3 - завихрювач; 4 - підвіска жарової труби; 5 - забірник первинного повітря; 6 - фронтний пристрій; 7 - отвори первинної зони; 8 - отвори зони змішування; 9 - гофровані щілини системи охолодження; 10 - кільце ущільнювача; 11- корпус; 12 - вихід з компресора приєднувальний фланець; 13 - дифузор; 14 – полум'яперекидаючий патрубок

Протиточні камери застосовують у малогабаритних двигунах і допоміжних силових установках. (рис. 2) Переваги: мала довжина двигуна та його ротора. Недоліки: великі гідравлічні втрати та діаметральний розмір.

Камери згоряння з подачею палива в паровій фазі застосовуються в ГТД порівняно рідко: складно виконати випарну систему, що надійно працює, що представляє собою набір трубок, розташованих в зоні горіння. Усередині цих трубок проходить сильно збагачена паливоповітряна суміш, що підігрівається до повного випаровування палива.

Камери згоряння з подачею палива в рідкій фазі набули переважного поширення в ГТД. У них паливо подається через форсунки, призначені для отримання найкращого розпилю та змішування палива. Діаметр крапель палива зазвичай становить від 10 до 400 мк. Паливо в камери згоряння сучасних ГТД підводиться лише потоком повітря.

Трубчаста (індивідуальна) камера згоряння (рис. 3, а див. рис. 1) складається з однієї жарової труби, розташованої всередині кожуха. Число трубчастих камер у двигуна зазвичай становить від 6 до 10 і більше. Розташовуються вони рівномірно навколо середнього корпусу двигуна. Всі камери згоряння повідомлені між собою з'єднувальними патрубками для передачі полум'я від запальних пристроїв та вирівнювання тиску.

Переваги: легке доведення, добре компонуються з відцентровим компресором, не збільшуючи діаметральних розмірів, не вимагають розбирання двигуна при заміні в умовах експлуатації. Недоліки: велика вага, необхідність мати газозбірник та пристрої великої кількості ущільнень у місцях з'єднань, підвищені гідравлічні опори та наявність кожухів, що не входять до силового корпусу двигуна.

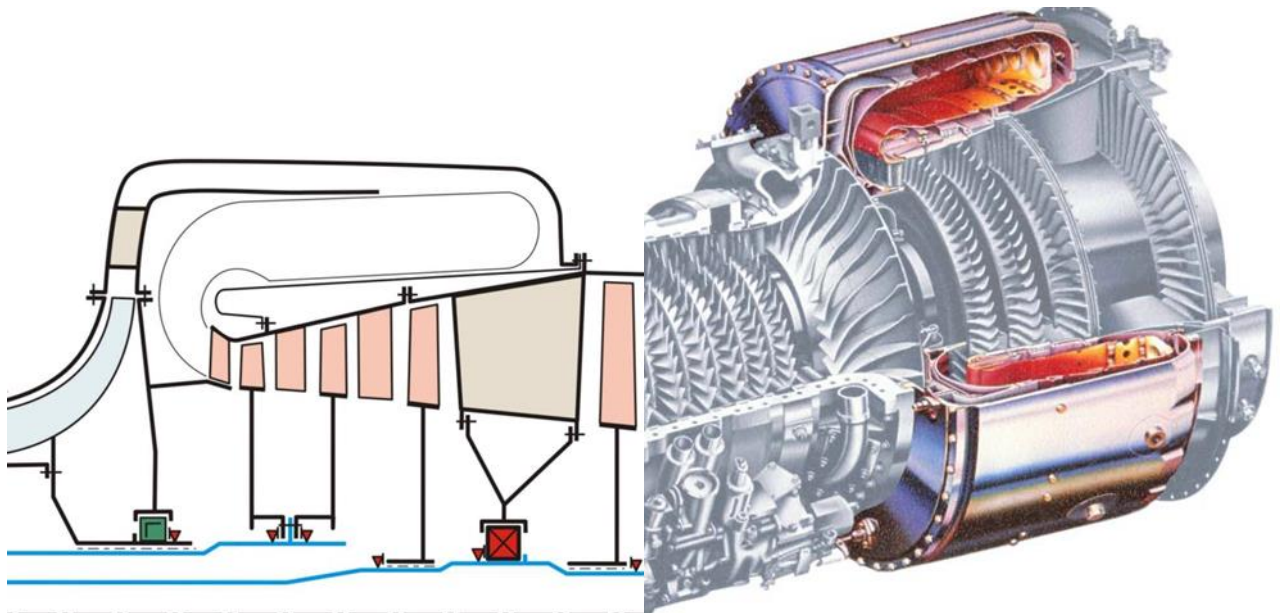


Рис.2 Протivotочна КС

Кільцева камера згоряння (рис. 3, б) застосовується на двигунах з відносно малою витратою повітря. Основними елементами її є: жарова труба 3 (рис. 4), що має кільцевий переріз, 1 зовнішній і внутрішній 2 корпуси, що утворюють проточну частину. У передній частині жарової камери приварюють чи приклепують головки. У головках встановлюють завихрювачі та форсунки, число яких може досягати 10-24 шт. і більше, запальники.

Переваги: компактність, малі гідравлічні опори, вага та діаметральні розміри, можливість повторного займання палива від сусідніх форсунок при зриві полум'я з однією з форсунок, рівномірне поле тиску та температури.

Недоліки: великі труднощі при доведенні; утруднено огляд та заміну жарової труби в умовах експлуатації; важко забезпечити достатню жорсткість тонкостінної оболонки при великих діаметральних розмірах.

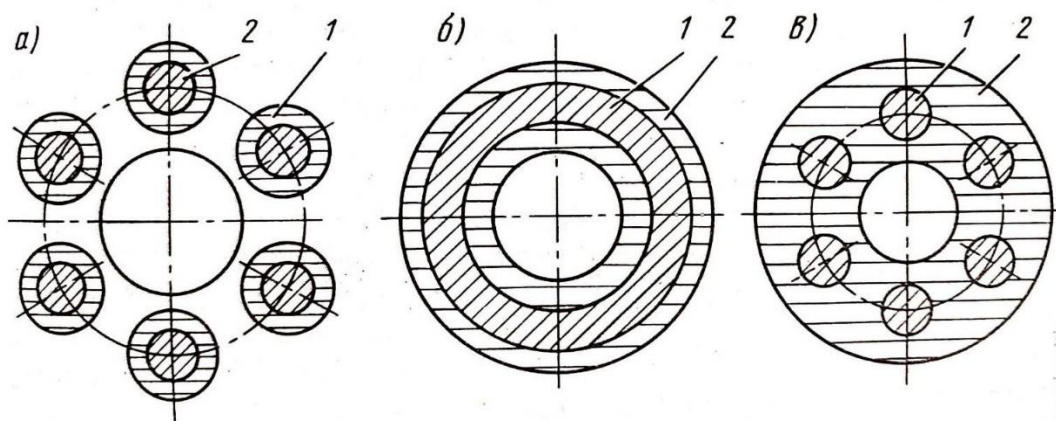


Рис. 3. Схеми камер згоряння: а-трубчаста (індивідуальна); б - кільцева; в-трубчато-кільцева; 1 - жаровий простір; 2 - простір, займане вторинним повітрям

Трубчато-кільцева камера згоряння (рис. 3, в) поєднує в собі позитивні сторони кільцевої та трубчастої камер. Жарові труби 9 (рис. 5), аналогічні конструкції жаровим трубам індивідуальних камер, розташовані в кільцевому просторі між зовнішнім 5 і внутрішнім 10 корпусами і з'єднані між собою за допомогою патрубків. Наявність окремих жарових труб полегшує доведення

камери та організацію процесу горіння в ній, а корпуси зазвичай включають у силову систему двигуна. Діаметральні розміри зовнішнього корпусу вибирають близькими до розмірів корпусу турбіни. У ваговому відношенні трубчато-кільцеві камери згоряння займають проміжне положення між індивідуальними та кільцевими камерами згоряння.

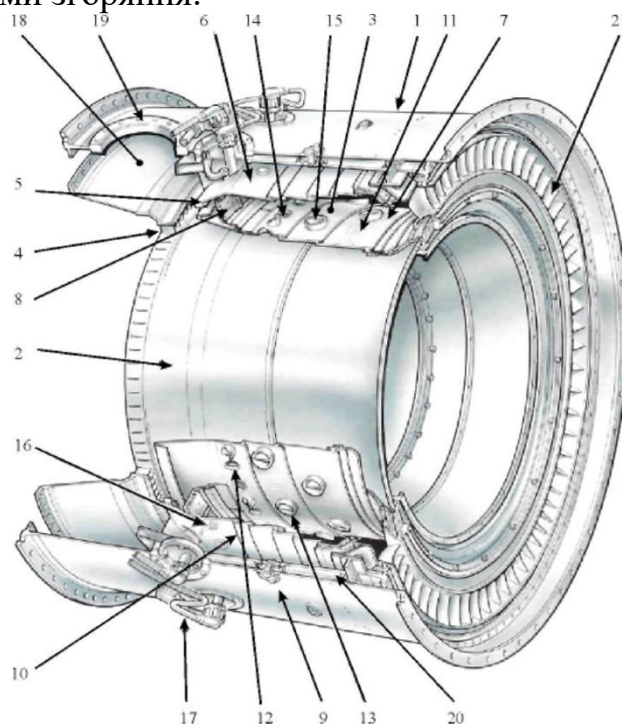


Рис. 4. Кільцева КС двигуна

1 - зовнішній корпус; 2 - внутрішній корпус; 3 - жарова труба; 4 - напрямний апарат компресора; 5 - кільце дифузора зовнішнє; 6 - зовнішня стінка жарової труби; 7 - внутрішня стінка жарової труби; 8 - фронтна плита; 9 - підвіска жарової труби; 10 - пояс системи охолодження; 11 - отвори перфорації; 12 - отвори підведення повітря в первинну зону; 13 - отвори зони змішування; 14 - козирок; 15 - втулка; 16 - паливна форсунка; 17 - паливний колектор; 18 - порожнина відборів повітря; 19 - фланець відбору повітря; 20 - внутрішня стінка зовнішнього корпусу; 21 - сопловий апарат турбіни

3. Сили, діючі на камеру згорання та викликаємі ними напруги.

Елементи камер згорання відчують напруги від газових та інерційних сил, сил ваги, а також нерівномірності нагріву матеріалу та вібрацій. Крім того, при включенні елементів камери в силову систему двигуна виникають додаткові напруги під дією сил і моментів, що передаються від інших вузлів.

Жарові труби схильні до дії невеликого перепаду тиску повітря. Основними навантаженнями є теплові, викликані нерівномірністю нагріву стінок.

Зовнішній корпус відчуває розтяг по утворює під дією внутрішнього надлишкового тиску, розтяг по поперечному перерізі від осьової сили, що передається від корпусу турбіни, і скручування під дією крутного моменту. Внутрішній корпус стискається зовнішнім надлишковим тиском і піддається впливу осьової сили і моменту, що крутить. Крім того, на корпуси діють сили ваги та згинальні моменти, що передаються від корпусу турбіни та задньої опори ротора двигуна. На працюючому двигуні деякі елементи камер згорання, що являють собою тонкостінні оболонки, схильні до вібрацій, які викликають у матеріалі цих оболонок втомні напруження, нерідко обмежують термін служби двигуна.

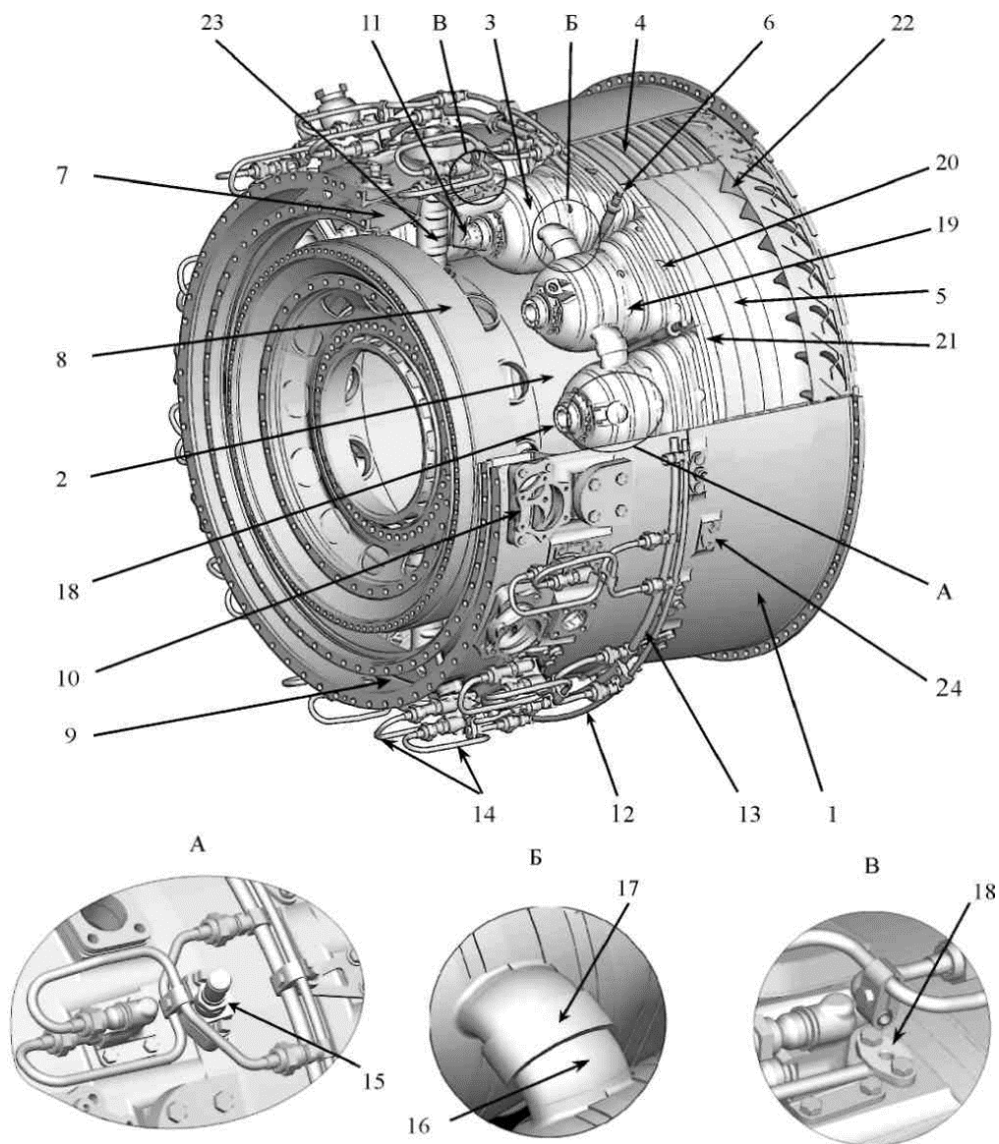


Рис. 5 Трубчато-кільцева камера згорання

1 - зовнішній корпус КС; 2 - внутрішній корпус КС; 3 - жарова труба; 4 - зовнішнє кільце газозбірника; 5 - внутрішнє кільце газозбірника; 6 - силова стійка; 7 - зовнішнє кільце дифузора; 8 - внутрішнє кільце дифузора; 9 - порожнина відборів повітря; 10 - фланці відбору повітря; 11 - форсунка; 12 - паливний колектор першого контуру; 13 - паливний колектор другого контуру; 14 - трубопроводи підведення палива до форсунки; 15 - свічки запалювання; 16 – полум'яперекидаючий патрубкок; 17 - полум'яперекидаюча муфта; 18 - підвіска жарової труби; 19 - отвори первинної зони; 20 - отвори зони змішування; 21 - рамковий фланець жарової труби; 22 - сопловий апарат ТГД; 23 - перепускна труба; 24 - лючок огляду.

4. Конструктивні елементи камери згорання.

Дифузор конструктивно в кільцевих і трубчато-кільцевих камерах являє собою профільовану литу або зварену сталеву горловину. Зварні дифузори в порівнянні з литими більш технологічні, мають меншу вагу і отримали найбільше поширення.

Жарова труба секційного типу, є набір вузьких конічних кілець 3 (див. рис. 4), з'єднаних зварюванням або клепкою. У місцях з'єднання секцій є кільцеві щілини для спрямування повітря вздовж внутрішніх поверхонь стінок з

метою їх охолодження. (Рис. 6).

Для створення теплоізоляції, вирівнювання температури по товщині стінки та попередження розтріскування внутрішні, а іноді і зовнішні стінки жарових труб покривають спеціальними жаростійкими емалями.

Пристрої, з яких створюються зони зворотних струмів, називаються *стабілізаторами*. Як стабілізатори найчастіше застосовують завихрювачі, що являють собою лопатки, штамповані з листового матеріалу і приварені до внутрішнього та зовнішнього кільця в головці жарової труби (рис. 7, а). З цією ж метою іноді застосовують спеціальні конуси, що встановлюються в передній частині жарової труби (рис. 7, б) або безпосередньо в передній стінці. В останній виконують спеціальні прорізи – щілини.

Вторинне повітря підводиться через вікна або патрубки, виконані в стінках жарової труби. Форма і розміри вікон і патрубків можуть бути різноманітними. Щоб поліпшити охолодження та підвищити жорсткість жарових труб, іноді роблять ребра (рис. 8, а, б).

Для підвищення міцності та жорсткості стінки в зоні отворів та покращення охолодження кромek виконують окантовку пістонами (рис. 8, в) або відбирання отворів (рис. 67, г, д). У місцях з'єднання менш нагрітих деталей жарової труби з більш нагрітими роблять розрізи, що компенсують, — «температурні шви».

Змішувальні патрубки (рис. 8 ж, з) забезпечують більш глибоке проникнення вторинного повітря в ядро потоку гарячих продуктів згоряння, тому вони зазвичай використовуються в кільцевих камерах згоряння. У патрубках, розташованих у потоці газу з високою температурою, застосовують вставки А (рис. 8, з), які покращують охолодження передніх стінок патрубків.

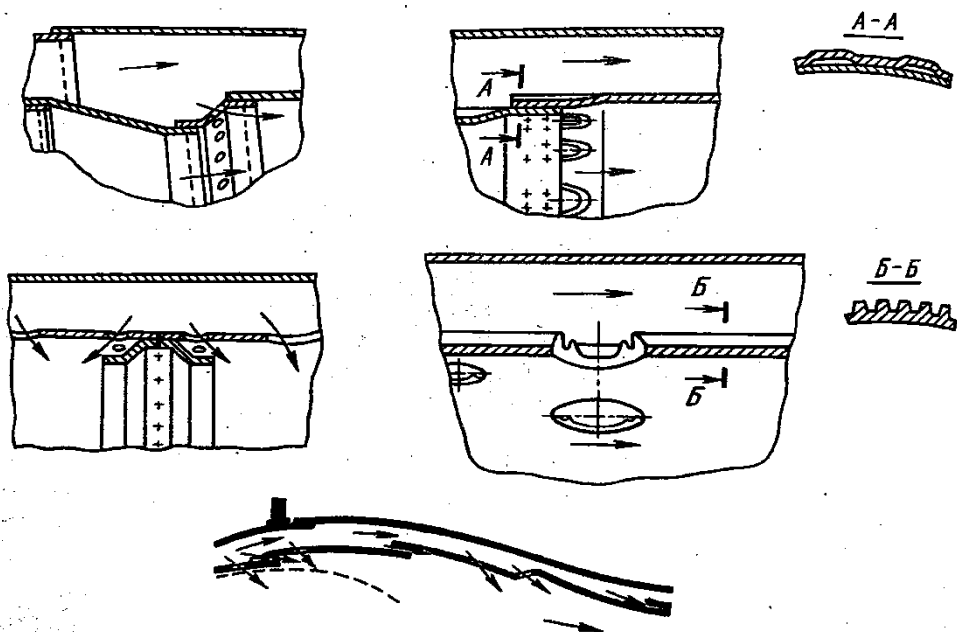


Рис. 6. Способи підведення повітря для здійснення загороджувального охолодження

Корпуси чи кожухи є циліндричні чи конічні оболонки. Корпуси, на відміну від кожухів, включають у силову систему двигуна. Кожухи застосовують у трубчастих камерах згоряння, а корпуси - в кільцевих та трубчасто-кільцевих. Жарові труби не включають до силової системи двигуна, тобто кріплять у корпусі камери згоряння так, що забезпечується вільне температурне розширення при нагріванні.

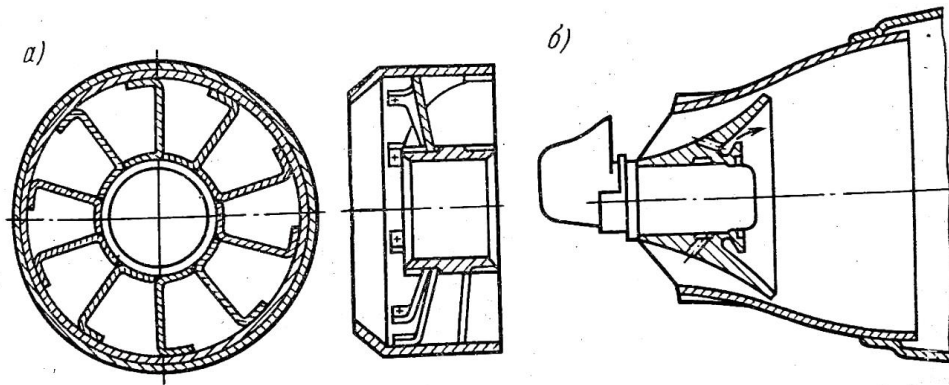


Рис. 7. Завихрювачі: а-лопатковий; б-безлопатковий

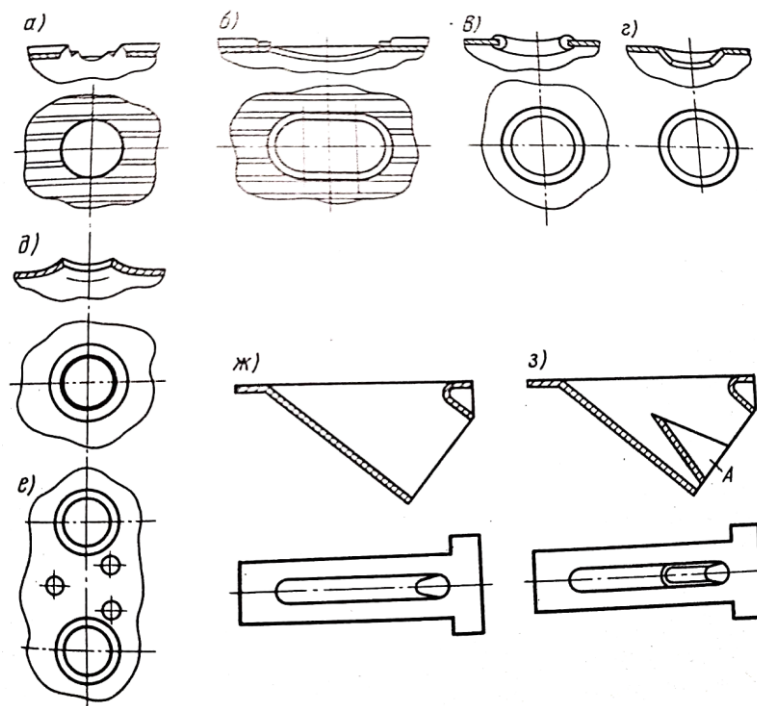


Рис. 8. Форма вікон і патрубків для підведення повітря всередину жарових труб:
а, б, в, г, д, е - різні форми вікон у стінці жарової труби;
ж, з-змішувальні патрубки; А - вставка для зменшення перерізу каналу патрубка

5. Матеріали камер згорання.

Матеріали, застосовувані виготовлення окремих деталей основних і форсажних камер згорання, вибирають залежно від температури цих деталей під час роботи.

Для зовнішнього кожуха, що нагрівається до 700°C , можна застосовувати вуглецеву сталь 10, при більш високих температурах використовують нержавіючу хромонікелеву сталь з титаном 1Х18Н9Т. Ця сталь стійка проти окислення, має високу пластичність, допускає глибоку витяжку та інші види холодного штампування, добре зварюється всіма видами зварювання.

Для жарових труб камер згорання при температурах 800°C застосовують сталь EI402 (ОХ18Ш2Б), EI435 (ХН78Т).

Для камер згорання, що працюють при температурах 900°C , можна застосовувати матеріали EI417, EI602 (ХН75МБТЮ), при температурах 950°C - матеріал EI894 і при температурах $950-1100^{\circ}\text{C}$ - матеріал EI868 (ХН60В).