

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

НАЛИВАЙКО В. С.
ТКАЧЕНКО С. Г.
ХОМЕНКО В. С.
АВДІЮНІН Р. Ю.

ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДВЗ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для поглибленого вивчення курсу та отримання
практичних навичок при створенні математичних моделей
процесів ДВЗ та конструкції окремих вузлів і деталей
для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»
(спеціалізація «Двигуни внутрішнього згоряння»)

*Рекомендовано Вченою радою НУК
(протокол засідання № 4 від 28.04.2017 р.)*

Миколаїв
Видавець Торубара В. В.
2017

УДК 621.311.230.016.3(075)

ББК 39.455.5 с51.я73

О-75

Автори: *В. С. Наливайко*, к. т. н., професор кафедри ДВЗ НУК (передмова, розд. 2 (п.р. 2.1), розд. 4, розд. 5);
С. Г. Ткаченко, к. т. н., доцент (розд. 1, розд. 3 (п.р. 3.1), розд. 7);
В. С. Хоменко, викладач (розд. 2 (п.р. 2.2), розд. 6);
Р. Ю. Авдюнін, викладач (розд. 1 (п.р. 1.2), розд. 3 (п.р. 3.2, 3.3, 3.4))

Рецензенти: *П. Г. Гакал*, д-р техніч. наук, професор завідувач кафедри аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ»;
С. І. Сербін, д-р техніч. наук, професор, директор Машинобудівного інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Б. Г. Тимошевський, д-р техніч. наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Основи комп'ютерного проектування ДВЗ : навчальний посібник для по-
О-75 глибленого вивчення курсу та отримання практичних навичок при створенні математичних моделей процесів ДВЗ та конструкції окремих вузлів і деталей для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» (спеціалізація «Двигуни внутрішнього згоряння») / В. С. Наливайко, С. Г. Ткаченко, В. С. Хоменко, Р. Ю. Авдюнін. — Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2017. — 138 с.

ISBN 978-617-7472-03-1

Навчальний посібник має на меті поглибити знання студентів при вивченні дисципліни «Основи комп'ютерного проектування ДВЗ» та допомогти придбати практичні навички створення математичних моделей процесів, які відбуваються в циліндрах двигунів внутрішнього згоряння, а також показати, як користуватись моделями у процесі проектування вузлів або окремих деталей ДВЗ. Крім цього, окремі частини даного навчального посібника будуть корисними і при вивченні інших дисциплін, які передбачені в навчальних планах рівня підготовки «магістр», наприклад, «Теорія робочих процесів двигунів внутрішнього згоряння». Навчальний посібник побудовано виключно на матеріалах, які отримані на кафедрі суднового машинобудування та енергетики Херсонської філії НУК при проведенні науково-дослідницьких робіт.

Навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування» (спеціалізація «Двигуни внутрішнього згоряння»).

УДК 621.311.230.016.3(075)

ББК 39.455.5 с51.я73

ISBN 978-617-7472-03-1

© Наливайко В. С., Ткаченко С. Г.,
Хоменко В. С., Авдюнін Р. Ю., 2017

ПЕРЕДМОВА

Потреба у вивченні дисципліни «Основи комп'ютерного проектування ДВЗ» викликана принциповою зміною методів проектування при створенні сучасних двигунів.

У навчальному посібнику справедливо вказано на слабкі сторони процесу створення двигунів внутрішнього згоряння за старими методами проектування — значні терміни до моменту запуску в серію двигунів, а також недостатня їх якість.

Довгий час проектування ДВЗ базувалось, в основному, на кваліфікації проєктантів, їх практичному досвіді роботи та інтуїції.

Якщо взяти до уваги, що весь цикл складається з двох основних етапів: проектування та виготовлення головних зразків, то всі похибки закладаються на першому етапі. Це часто призводило до того, що помилки, як правило, визначались тільки на останньому етапі створення двигунів — при стендових випробуваннях головних двигунів перед запуском їх у серію.

Із цих причин процес створення двигунів розтягувався на 5...10 років, що значно сповільнювало проектування сучасних двигунів і призводило до відставання цілої промислової галузі виробництва двигунів внутрішнього згоряння. Усього цього можна було б уникнути при умові достатньої достовірності розрахунків.

Відсутність точних методів розрахунків змушувала проводити розрахунки за дуже спрощеними формулами. Теорія точних розрахунків була відома, а точних методів рішення дуже складних залежностей не було.

Ця проблема зникає при переході на рішення складних математичних залежностей чисельними методами. Ці методи є теж приблизними, але при розумному їх використанні можна гарантувати точність, яка задовольняє проєктантів.

Друга умова полягала в кількості обчислювальної техніки та її потужності.

На даний час ці умови не стримують проведення розрахунків із необхідною точністю.

Залишилося питання — чим забезпечити прискорення процесу проектування та підвищити його якість, особливо на початковій стадії (ескізному проектуванні).

Відповідь одна — в процес проектування треба ввести додаткову складову, яка повинна включати процес створення математичних моделей та проведення обов'язкового модельного дослідження. І тільки після етапу досліджень на моделі слід приступати до виконання ескізного проекту.

Що стосується комп'ютерного виконання креслень, то ця робота повинна проводитись одночасно з моделюванням процесів, які відбуваються в двигунах, та моделюванням конструктивних залежностей окремих вузлів або деталей.

З урахуванням цього, при створенні двигунів внутрішнього згоряння треба повністю відмовитись від «ручної праці» і перейти на комп'ютерне проектування. Це значно скоротить цей процес та зробить його практично безпомилковим.

Під кінець підкреслимо основні переваги, які дає комп'ютерне проектування:

- різке зменшення термінів проектування;
- покращення економічних та екологічних показників двигунів;
- зменшення кількості хибних рішень;
- здешевлення як робіт під час проектування, так і загальної вартості двигуна;
- підвищення якості продукції (двигунів);
- збільшення ресурсу роботи двигунів;
- зменшення експлуатаційних витрат за рахунок прийнятих оптимальних рішень, отриманих при модельному дослідженні.

Навчальний посібник відповідає програмі дисципліни і буде одним з перших у напрямку переходу на комп'ютерне проектування ДВЗ.

Матеріал посібника охоплює увесь шлях від створення розрахункових схем, розробки комп'ютерних програм, дослідження математичних моделей до створення комп'ютерних креслень.

1 СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІДОКРЕМЛЕНОГО ІНДИКАТОРНОГО ЦИКЛУ ДВЗ

У зв'язку з тим, що основним у роботі ДВЗ є індикаторний цикл, а всі інші процеси розглядаються як похідні, зупинимось більш детально на створенні основної моделі відокремленого індикаторного циклу.

Передусім слід розкрити саме поняття «математична модель» стосовно будь-якого процесу, який відбувається при роботі двигуна.

На наш погляд, найбільш точним буде таке формулювання: математична модель (наприклад, процесу) — *це спеціально створена система математичних співвідношень, які описують досліджуваний процес, і розроблена таким чином, що самостійно налаштовується на отримання очікуваного результату.*

У зв'язку з тим, що індикаторний цикл є основним в роботі двигуна, потрібно розглянути спочатку схему побудови математичної моделі відокремленого індикаторного циклу, яку будемо використовувати під назвою «Індикаторний цикл».

Індикаторний цикл у подальшому буде розглядатися як відокремлений у зв'язку з тим, що ця модель у подальшому буде вмонтована в кінцеву заключну модель робочого процесу двигуна.

Як буде показано нижче, ця модель дозволяє охопити одночасно найбільшу кількість параметрів процесів у циліндрі двигуна. Таким чином, ця модель відноситься до класу узагальнених (багатопараметрових) і дає можливість досліджувати більш ніж сто параметрів.

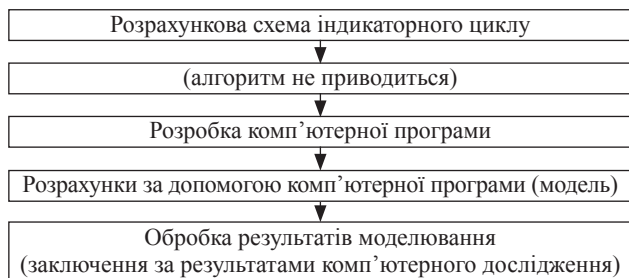
А якщо брати до уваги кількість параметрів (приблизно п'ятдесят), які одночасно розраховуються в процесі моделювання (а при заміні частини вхідних параметрів на вихідні ця кількість перевищує сто одиниць), то це дає підставу вважати модель індикаторного циклу як узагальнену, що моделює велику кількість процесів, які відбуваються одночасно з основним процесом. Як основний процес можна прийняти будь-який, наприклад, побудову індикаторної діаграми.

Це не виключає можливості створення окремих математичних моделей супутніх процесів. У зв'язку з тим, що супутні процеси порівняно прості, в посібнику наводяться тільки розрахункові схеми цих процесів та кінцеві результати для деяких розрахунків, які раніше залишались поза увагою.

Це такі розрахунки:

- залежність індикаторного ККД двигуна від абсолютних розмірів циліндра ($D_{ц}$, S);
- визначення оптимального відношення $S/D_{ц}$ для різних типів двигунів (наводиться тільки розрахункова схема);
- мінімізація питомої поверхні охолодження циліндра (процес мінімізації наведений в якості розрахункової схеми, яка може бути реалізована за допомогою моделі індикаторного процесу або у будь-який інший спосіб);
- інше.

Базова математична модель представлена у повному обсязі у такій послідовності:



Перед початком створення моделі виникає питання — створювати модель робочого процесу взагалі для турбопоршневого двигуна чи звузити, не виходячи за межі циліндра, тобто почати з першого (базового) процесу, яким є індикаторний цикл. Цей цикл є первинним, на базі якого проходять всі процеси, включаючи процес повітряпостачання, газовідводу та інше.

На наш погляд, спочатку більш доцільним буде створення математичної моделі індикаторного циклу, виділивши його окремо.

Перевагами такого рішення є:

- відокремлення індикаторного циклу дозволяє провести розрахунки з меншими можливими грубими припущеннями (визначення механічних втрат, процеси наповнення, очищення циліндра та інше);
- модель відокремленого індикаторного циклу буде значно простіша, а найбільш важливо — дозволяє скоротити час при моделюванні та отримати більш достовірні дані за оптимальними індикаторними параметрами;
- після завершення моделювання відокремленого індикаторного циклу цю модель можна включити як складову при створенні узагальненої моделі повного робочого процесу турбопоршневих двигунів.

1.1 Побудова розрахункової схеми відокремленого індикаторного циклу

Ця схема фактично виконує функцію алгоритму при створенні математичної моделі та складанні комп'ютерної програми проходження відокремленого індикаторного циклу.

При вивченні розрахункової схеми в основу покладено закон збереження енергії.

У зв'язку з цим послідовність розрахунків суттєво відрізняється від широко відомих розрахунків (наприклад, метод Гріневецького–Мазінга). Поняття політропи та інше в запропонованій схемі відсутнє, що виключає можливість появи додаткових похибок, чим сам розрахунок значно наближується до дійсних процесів, які відбуваються в циліндрі.

Схема розрахунків за запропонованою схемою не є складною і потребує від студентів її детального розгляду.

Нижче наведена схема розрахунку з необхідними поясненнями.

На рис. 1.1 показана термодинамічна схема стану робочого тіла, на базі якої можна вести розрахунки.

Спираючись на схему *в*, напишемо енергетичний баланс для робочого тіла (процес стиснення):

$$dU = dQ_{\text{п}} + dL - dQ_{\text{ц}}, \quad (1)$$

де U — внутрішня енергія робочого тіла, кДж;

$Q_{\text{п}}$ — теплова енергія, яка додається до робочого тіла за рахунок згоряння палива, кДж;

L — механічна енергія, яка додається до робочого тіла, кДж;

$Q_{\text{ц}}$ — втрати теплової енергії через стінки циліндра, кДж.

Інтегруючи рівняння (1) в межах від стану $(i - 1)$ до стану i , отримаємо:

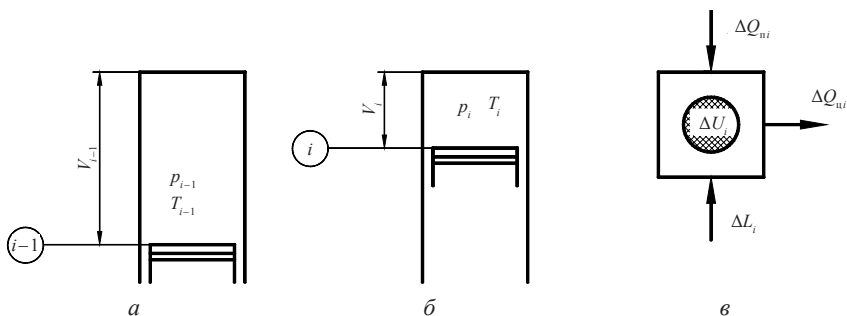


Рис. 1.1. Термодинамічна схема проходження індикаторного циклу:

a — початковий стан робочого тіла; *б* — кінцевий стан робочого тіла;
в — енергетичний баланс робочого тіла на протязі розрахункової ділянки

$$U_i - U_{i-1} = Q_{п,i} - Q_{п,i-1} + L_i - L_{i-1} - Q_{ц,i} - Q_{ц,i-1}, \quad (2)$$

або

$$\Delta U_i = \Delta Q_{пi} + \Delta L_i - \Delta Q_{цi}. \quad (3)$$

В такому вигляді рівняння (3) є придатним для рішення його чисельними методами за допомогою ЕОМ.

Рівняння (3) описує відокремлений індикаторний цикл двигуна внутрішнього згоряння на всьому протязі, а його розв'язання дає інструмент для проведення практичних розрахунків робочих процесів двигунів.

Розкриємо складові рівняння (3) для i -ї розрахункової ділянки. В цьому разі індекс « $i-1$ » означає початок ділянки, а « i » — кінець розрахункової ділянки.

$$\Delta U_i = q_{ц} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_i \cdot c_{v_i} \cdot T_i - q_{ц} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_{i-1} \cdot c_{v_{i-1}} \cdot T_{i-1}; \quad (4)$$

$$\Delta Q_{пi} = \Delta x_i \cdot q_{ц} \cdot Q_{н} \cdot \chi; \quad (5)$$

$$\Delta L_i = 0,5 \cdot (p_i + p_{i+1}) \cdot (v_1 - v_2); \quad (6)$$

$$\Delta Q_{цi} = \Delta Q_{вті} + \Delta Q_{кри} + \Delta Q_{прі}, \quad (7)$$

де $\Delta Q_{вті}$ — втрати теплоти через втулку циліндра, кДж;

$\Delta Q_{кри}$ — втрати теплоти через кришку циліндра, кДж;

$\Delta Q_{прі}$ — втрати теплоти через поршень, кДж;

$\Delta Q_{пi}$ — теплова енергія, яка додається до робочого тіла за рахунок спалювання палива на протязі i -тої ділянки;

$q_{ц}$ — циклова подача палива, кг/цикл;

L — дійсна молярна кількість повітря, яка потрібна для спалювання 1 кг палива, кмоль/кг;

γ_r — коефіцієнт залишкових газів;

β_{i-1}, β_i — коефіцієнти мольної зміни на початку та наприкінці розрахункової ділянки;

$c_{v,i-1}, c_{v,i}$ — дійсна ізохорна теплоємність газів на початку та наприкінці розрахункової ділянки, кДж/(кмоль · К);

T_{i-1}, T_i — температура газів на початку та наприкінці розрахункової ділянки, К;

Δx_i — частка палива, яке згоріло на протязі розрахункової ділянки;

$Q_{н}$ — нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

χ — коефіцієнт якості згоряння палива (враховує неповноту згоряння, дисоціацію молекул та інше);

p_{i-1}, p_i — тиск газу в циліндрі на початку та наприкінці розрахункової ділянки, МПа;

V_{i-1} , V_i — об'єм робочого тіла на початку та наприкінці розрахункової ділянки, м³.

Визначимо зміст основних складових рівняння (1) у порядку їх застосування при розрахунках.

При визначенні довжини розрахункової ділянки найбільш зручно вибрати не приріст об'єму ΔV , а зміну кута повороту кривошипу колінчастого валу $\Delta\varphi_k$.

Для визначення кінця розрахункової ділянки треба додати крок розрахунку $\Delta\varphi_k$, тобто

$$\varphi_{k,i} = \varphi_{k,i-1} + \Delta\varphi_k, \quad (8)$$

де $\varphi_{k,i-1}$ — кут повороту кривошипу на початку розрахункової ділянки.

Об'єм робочого тіла на початку та наприкінці розрахункової ділянки:

$$V_{i-1} = V_c + F_{\text{ц}} \cdot R \cdot \left[(1 - \cos \varphi_{k,i-1}) + \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4} (1 - \cos 2\varphi_{k,i-1}) \right], \text{ м}^3; \quad (9)$$

$$V_i = V_c + F_{\text{ц}} \cdot R \cdot \left[(1 - \cos \varphi_{k,i}) + \frac{\lambda_{\text{ш}}}{4} (1 - \cos 2\varphi_{k,i}) \right], \text{ м}^3, \quad (10)$$

де V_c — об'єм камери стиску, м³;

$F_{\text{ц}}$ — площа поперечного перетину циліндру, м²;

$\lambda_{\text{ш}}$ — параметр кривошипно-шатунного механізму.

Частка палива, яке догоріло, на початок та кінець i -тої розрахункової ділянок:

$$x_{i-1} = \kappa_{\text{п}} \cdot (1 - e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{п},i-1}}{\varphi_z} \right)^{m+1}}); \quad (11)$$

$$x_i = \kappa_{\text{п}} \cdot (1 - e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\varphi_{\text{п},i}}{\varphi_z} \right)^{m+1}}), \quad (12)$$

де $\kappa_{\text{п}}$ — коефіцієнт палива (приймається $\kappa_{\text{п}} = 0$ для процесів «чистого» стиснення та «чистого» розширення, а для процесу згоряння $\kappa_{\text{п}} = 1$);

$\varphi_{\text{п},i-1}$, $\varphi_{\text{п},i}$ — кути повороту кривошипу на момент початку та кінця i -ї розрахункової ділянки, рахуючи кути від моменту спалаху палива, град;

φ_z — кут згоряння палива, град;

m — показник характеру згоряння.

Коефіцієнт мольної зміни газу для початку і кінця i -ї розрахункової ділянки:

$$\beta_{i-1} = 1 + \frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \cdot x_{i-1}; \quad (13)$$

$$\beta_i = 1 + \frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \cdot x_i, \quad (14)$$

де β_0 — теоретичний (хімічний) коефіцієнт мольної зміни.

Частка палива, яке згоряє на i -й ділянці:

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}. \quad (15)$$

Середня температура газів на протязі i -ї ділянки:

$$T_{\Gamma i} = \frac{T_{i-1} + T_i}{2}, \text{ К}, \quad (16)$$

де T_{i-1} — температура газу на початку i -ї ділянки (відома з попередньої ділянки);

T_i — температура газу наприкінці i -ї ділянки.

Ця величина є невідомою на даний момент, тому треба у першому наближенні прийняти $T_i \approx T_{i-1} + (20 \dots 30 \text{ К})$. В подальших розрахунках величина T_i буде уточнюватись.

Тиск газів наприкінці i -ї ділянки:

$$p_i = \frac{T_i}{T_{i-1}} \cdot \frac{V_{i-1}}{V_i} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}} \cdot p_{i-1}, \text{ МПа}. \quad (17)$$

Середній тиск газу на протязі i -ї розрахункової ділянки:

$$p_{\Gamma i} = \frac{p_{i-1} + p_i}{2}, \text{ МПа}. \quad (18)$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі від газу до внутрішньої поверхні циліндра на протязі i -ї розрахункової ділянки [4]:

$$\alpha_{\Gamma i} = 7,74 \cdot c_m^{0,33} \cdot p_{\Gamma i}^{0,5} \cdot T_{\Gamma i}^{0,5}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (19)$$

де c_m — середня швидкість поршня, м/с.

Коефіцієнти в рівняннях істинних теплоємностей на початку та наприкінці i -ї розрахункової ділянки:

$$a_{v,i-1} = \frac{23,967 \cdot (1,064 \cdot x_{i-1} + \gamma_r) + 20,699 \cdot [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_{i-1} + \gamma_r)]}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_{i-1}}, \quad (20)$$

$$b_{i-1} = \frac{0,00461 \cdot (1,064 \cdot x_{i-1} + \gamma_r)}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_{i-1}} + \frac{0,00377 \cdot [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_{i-1} + \gamma_r)]}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_{i-1}}, \quad (21)$$

$$a_{v,i} = \frac{23,967 \cdot (1,064 \cdot x_i + \gamma_r) + 20,699 \cdot [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_i + \gamma_r)]}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_i}, \quad (22)$$

$$b_i = \frac{0,00461 \cdot (1,064 \cdot x_i + \gamma_r)}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_i} + \frac{0,00377 \cdot [\alpha \cdot (1 + \gamma_r) - (x_i + \gamma_r)]}{\alpha \cdot (1 + \gamma_r) + 0,064 \cdot x_i}. \quad (23)$$

Істинна ізохорна теплоємність газу на початку та наприкінці i -ї розрахункової ділянки:

$$c_{v,i-1} = a_{v,i-1} + b_{i-1} \cdot T_{\Gamma,i-1}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \quad (24)$$

$$c_{v,i} = a_{v,i} + b_i \cdot T_{\Gamma,i}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \quad (25)$$

Середня величина теплосприймаючої поверхні втулки за час проходження i -ї ділянки:

$$\Delta F_{\text{вті}} = \frac{V_{i-1} + V_i}{2F_{\text{ц}}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ц}}, \text{ м}^2, \quad (26)$$

де $F_{\text{ц}}$ — площа поперечного перерізу циліндру, м^2 ;

$D_{\text{ц}}$ — діаметр циліндра, м.

Час проходження i -ї ділянки:

$$\Delta \tau_i = \frac{\Delta \varphi_{\text{к}}}{6 \cdot n}, \text{ с}, \quad (27)$$

де $\Delta \varphi_{\text{к}}$ — крок розрахунку, к. п. к. (кут повороту кривошипа);

n — частота обертів колінчастого валу, хв^{-1} .

Середня температура охолоджуючої води:

$$T_{\text{в}} = 273 + \frac{t_{\text{в}}^{\text{вх}} + t_{\text{в}}^{\text{вих}}}{2}, \text{ К}, \quad (28)$$

де $t_{\text{в}}^{\text{вх}}, t_{\text{в}}^{\text{вих}}$ — температура входу та виходу охолоджуючої води з двигуна, $^{\circ}\text{С}$.

Середня температура циркуляційного масла:

$$T_{\text{в}} = 273 + \frac{t_{\text{м}}^{\text{вх}} + t_{\text{м}}^{\text{вих}}}{2}, \text{ К}, \quad (29)$$

де $t_{\text{м}}^{\text{вх}}, t_{\text{м}}^{\text{вих}}$ — температура циркуляційного масла на вході та виході з двигуна, $^{\circ}\text{С}$.

Кількість теплової енергії, яка додається до газів при згорянні палива на i -й ділянці:

$$\Delta Q_{\text{п},i-1} = q_{\text{ц}} \cdot \Delta x_i \cdot Q_{\text{н}}, \text{ кДж}, \quad (30)$$

де $Q_{\text{н}}$ — нижча теплота згоряння 1 кг палива, кДж/кг .

Кількість теплової енергії, що втрачається через бокову поверхню втулки на i -й ділянці:

$$\Delta Q_{\text{вті}} = \frac{T_{\text{ГІ}} - T_{\text{В}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{ГІ}}} + \frac{\delta_{\text{вті}}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}}}} \cdot \Delta F_{\text{вті}} \cdot \Delta \tau_i \cdot 10^{-3}, \text{ кДж}, \quad (31)$$

де $\delta_{\text{вті}}$ — товщина стінки втулки, м;

λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу втулки, Вт/(м·К);

$\alpha_{\text{В}}$ — коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні втулки до води, Вт/(м²·К).

Кількість теплової енергії, що втрачається через днище кришки на i -й ділянці:

$$\Delta Q_{\text{крі}} = \frac{T_{\text{ГІ}} - T_{\text{В}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{ГІ}}} + \frac{\delta_{\text{крі}}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}}}} \cdot \Delta F_{\text{ц}} \cdot \Delta \tau_i \cdot 10^{-3}, \text{ кДж}, \quad (32)$$

де $\delta_{\text{крі}}$ — товщина днища кришки циліндра, м.

Кількість теплової енергії, що втрачається через днище поршня при його охолодженні маслом:

$$\Delta Q_{\text{прі}} = \frac{T_{\text{ГІ}} - T_{\text{В}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{ГІ}}} + \frac{\delta_{\text{прі}}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{М}}}} \cdot \Delta F_{\text{ц}} \cdot \Delta \tau_i \cdot 10^{-3}, \text{ кДж}, \quad (33)$$

де $\delta_{\text{прі}}$ — товщина днища поршня, м;

$\alpha_{\text{М}}$ — коефіцієнт тепловіддачі від днища поршня до масла, Вт/(м²·К).

Таким чином отримані всі залежності для розрахунків всіх втрат енергії, а також можливих притоків енергії до робочого тіла. Розрахунки за цими залежностями використовують для рівняння (3).

Роботу газів визначимо через середній тиск та рівняння стану:

$$\begin{aligned} \Delta L_1 = \frac{p_{i-1} + p_i}{2} \cdot (V_{i-1} - V_i) = 4,157 \frac{V_{i-1} - V_i}{V_i} \cdot q_{\text{ц}} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_{i-1} \cdot T_{i-1} + \\ + 4,157 \frac{V_{i-1} - V_i}{V_i} \cdot q_{\text{ц}} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_i \cdot T_i. \end{aligned} \quad (34)$$

Після підстановки значень ΔU_i , ΔL_i , $\Delta Q_{\text{пі}}$, $\Delta Q_{\text{вті},i}$, $\Delta Q_{\text{крі},i}$, $\Delta Q_{\text{прі},i}$ в рівнянні енергетичного балансу (3) і розв'язання його відносно температури робочого тіла наприкінці i -ї ділянки (T_i), яка попередньо приймалась як приблизна, отримаємо кінцеве рівняння для знаходження температури робочого тіла. Одночасно з температурою T_i додатково визначаються найбільш важливі параметри робочого тіла за рівняннями, які входять в загальний розрахунковий ланцюг:

$$T_i = \frac{\Delta Q_{\text{ш}} - \Delta Q_{\text{вт},i} - \Delta Q_{\text{кр},i} - \Delta Q_{\text{пр},i}}{q_{\text{ц}} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_i \cdot \left(c_{\text{vi}} - 4,157 \frac{V_{i-1} - V_i}{V_i} \right)} + \frac{q_{\text{ц}} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_{i-1} \cdot \left(4,157 \frac{V_{i-1} - V_i}{V_i} + c_{\text{v},i-1} \right) \cdot T_{i-1}}{q_{\text{ц}} \cdot L \cdot (1 + \gamma_r) \cdot \beta_i \cdot \left(c_{\text{vi}} - 4,157 \frac{V_{i-1} - V_i}{V_i} \right)}. \quad (35)$$

Рівняння (35) є універсальним, тому що описує робочий процес двигуна внутрішнього згоряння на усіх етапах його проходження.

Механізм розрахунку робочого процесу за цією формулою має бути таким:

1. Розрахунки слід починати з першої ділянки (початок процесу стиснення), для якої відомі параметри робочого тіла після наповнення циліндру ($p_1 = p_a$, $T_1 = T_a$).

2. Для отримання значення температури у другому наближенні T_2 (це буде значення температури газів наприкінці першої розрахункової ділянки) слід прийняти значення T_2 у першому наближенні (наприклад, $T_2 \approx T_1 + 20$).

3. Прийняте значення T_2 слід використовувати для розв'язання рівнянь в такій послідовності (8–33, 35).

4. Після отримання температури T_2 із останнього рівняння його значення слід знову прийняти як друге наближення для розв'язання рівнянь в такій же послідовності.

5. Якщо різниця між значеннями температури T_2 для двох сусідніх наближень не буде перевищувати 5 К, процес наближення (ітерації) слід припинити, і останні значення всіх параметрів для цієї ділянки слід рахувати як такі, що досягли необхідної точності.

6. Після закінчення розрахунку параметрів для першої ділянки слід перейти до розрахунку параметрів для другої ділянки і так далі.

7. При цьому кінцеві параметри робочого тіла на попередній ділянці будуть початковими даними для наступної.

Використовуючи рівняння (35), були виконані розрахунки робочого процесу двигуна типу ЧН25/34 при його роботі на одному із часткових режимів навантаження. На рис. 1.2 наведена індикаторна діаграма, яка знята на працюючому двигуні, а також розрахункові діаграми, які побудовані за методом Гріневецького-Мазінга та альтернативним методом.

Співставлення діаграм показує, що характер індикаторного циклу для цих трьох випадків схожий. Найбільші відхилення мають місто на ділянці згоряння палива (біля ВМТ), що є зрозумілим, так як для метода Гріневецького-Мазінга для цієї частини процесу прийняті значні спрощення.

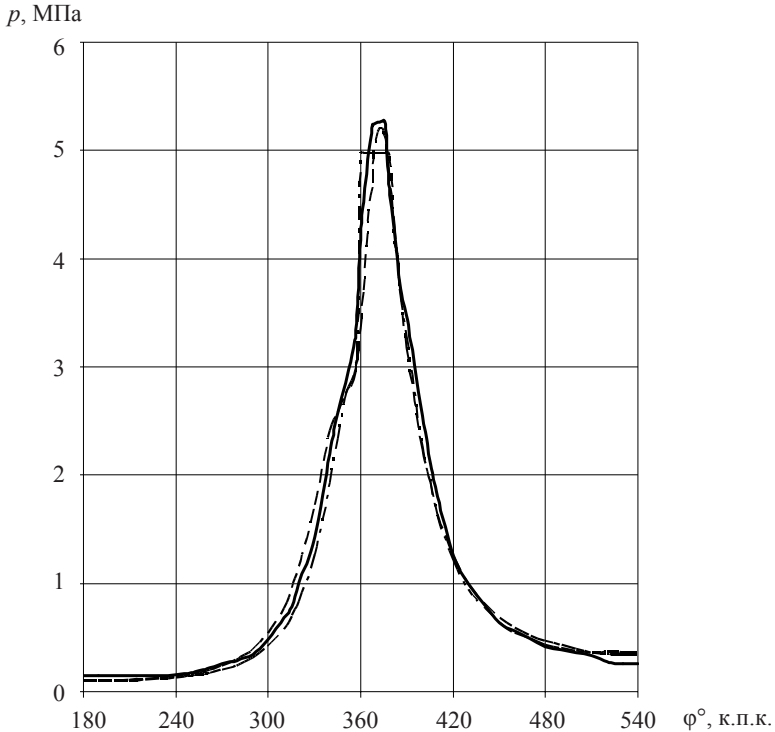


Рис. 1.2. Індикаторні діаграми:

- — реальна індикаторна діаграма двигуна;
- — розрахована за запропонованим методом (модель «Індикаторний цикл»);
- · - · — розрахована за методом Гріневецького-Мазінга

Попередні розрахунки за запропонованим методом інших більш форсованих двигунів показали, що розходження в результатах з класичним методом зростає з підвищенням ступеня форсування двигуна.

Примітка. Достатньо близьке співпадіння індикаторної діаграми, розрахованої за методом Гріневецького-Мазінга, з діаграмою, яка записана для реального двигуна 6ЧН25/34, пояснюється тим, що в розрахунок за методом Гріневецького-Мазінга вводяться спеціальні коригуючі коефіцієнти, значення яких приймається виключно для наближення розрахункових параметрів процесу з реальними для даного типу двигуна. Для розрахунків за запропонованим альтернативним методом таке коригування не проводиться, тому що такі коефіцієнти у розрахунковій моделі (назвемо цю модель умовно «індикаторний процес») не передбачені.

1.2 Складання комп'ютерної програми (алгоритму) для розрахунку відокремленого індикаторного циклу ДВЗ

Для даного навчального посібника основною математичною моделлю є модель відокремленого індикаторного циклу. У зв'язку з цим найбільша увага надається моделі цього процесу. Детально розглядаються схеми розрахунку (фактично це є алгоритм для створення комп'ютерної програми), наведена сама програма, фрагменти по вводу початкових даних та результати розрахунку у табличному та графічному вигляді.

Найбільш прийнятним для користування та складання програми є середовище Visual Basic Applications (VBA).

VBA — відносно легка мова програмування. Вона проста в освоєнні і дозволяє швидко одержувати відчутні результати.

VBA застосовує технологію візуального програмування, тобто конструювання робочої поверхні додатка та елементів його керування безпосередньо на екрані, а також запис усієї програми або її частин за допомогою Macrorecorder.

VBA належить до мов об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). ООП можна описати як методику аналізу, проектування й написання додатків за допомогою об'єктів. Усі візуальні об'єкти, такі як *робочий аркуш (worksheet)*, *діапазон (Range)*, *діаграма (Chart)*, *форма (userform)*, є об'єктами. В VBA є більш 100 вбудованих об'єктів.

Об'єкт сам по собі не представляє великого значення. Набагато значніше те, які дії можна робити над об'єктом і які властивості він має. Метод саме і являє собою дію, виконувану над об'єктом.

Суть програмування на VBA полягає в двох поняттях: подія й відгук на неї. Подія являє собою дію, що розпізнається об'єктом, для якого можна запрограмувати відгук. Події виникають у результаті дій користувача або програми, або ж вони можуть бути викликані системою.

Якщо користувач робить якийсь вплив на систему, скажемо, натискає кнопку, тоді в якості відгуку виконується код створеної користувачем процедури. Якщо такий відгук не створений, тобто не написана відповідна процедура, то система ніяк не реагує на дану подію, і воно залишається безмовним.

Структура редактора VBA

Редактор VBA активізується командою *Сервіс, Макрос, Редактор Visual Basic (Tools, Macro, Visual Basic Editor)* або натисканням кнопки *Редактор Visual Basic (Visual Basic Editor)* панелі інструментів *Visual Basic*. Вернутися з редактора VBA у робочу книгу можна за допомогою кнопки *Вид Microsoft Excel (View Microsoft Excel)*. Інтерфейс VBA складається з наступних осно-

вних компонентів: вікно проекту, вікно властивостей, вікно редагування коду, вікно форм, меню та панелі інструментів.

Вікно проекту

Вікно проекту в редакторі VBA активізується вибором команди *Вид, Вікно проекту* (View, Project window) або натисканням кнопки *Вікно проекту* (Project window). У вікні проекту Vbaproject представлена ієрархічна структура файлів форм і модулів поточного проекту (рис. 1.3).

У проекті автоматично створюється модуль для кожного робочого аркуша та для всієї книги. Крім того, модулі створюються для кожної користувачької форми, макросів і класів. За своїм призначенням модулі діляться на два типи: *модулі об'єктів і стандартні*. До стандартних модулів відносяться ті, які містять макроси. Такі модулі додаються в проект командою *Вставка, Модуль* (Insert, Module). До модулів об'єктів відносяться модулі, пов'язані з робочою книгою, робочими аркушами, формами, і модулі класу.

Форми створюються командою *Вставка, Userform* (Insert, Userform), а модулі класу — командою *Вставка, Модуль класу* (Insert, Module). У процесі створення, додавання і видалення файлів із проекту ці зміни відображаються у вікні проекту.

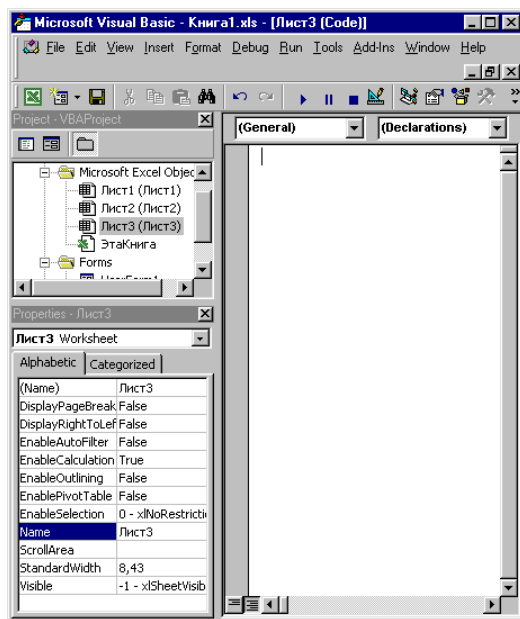


Рис. 1.3. Вікно проекту

У вікні проекту виводиться проект усіх відкритих робочих книг. Це дозволяє легко копіювати форми і коди з одного проекту в іншій, що прискорює процес створення нових додатків.

Вікно для редагування коду

Переміщення вказівника на значок файлу у вікні проекту відкриває вікно редактора коду (рис. 1.4) для відповідного модуля.

Вікно редагування коду служить як редактор для введення й зміни коду процедур додатка. Код усередині модуля організований у вигляді окремих розділів для кожного об'єкта. У вікні редагування доступні два режими: перегляд окремої процедури та усього модуля. Перемикання режимів роботи вікна редагування коду здійснюється вибором однієї із двох кнопок у нижньому лівому куті вікна редагування коду або установкою чи зняттям прапорця *Перегляд усього модуля* (Default to Full Module View) вкладки *Редактор* (Editor) діалогового вікна *Параметри* (Options), яке відображується на екрані командою *Сервіс, Параметри* (Tools, Options).

Інтелектуальні можливості редактора коду

Написання програм суттєво полегшується за рахунок здатності редактора коду автоматично завершувати написання операторів, властивостей і параметрів. При написанні коду редактор сам пропонує користувачеві список компонентів.

Автоматичне відображення списку компонентів відбувається тільки при встановленому прапорці *Список компонентів* (Auto List Members) вкладки *Редактор* (Editor) діалогового вікна *Параметри* (Options).

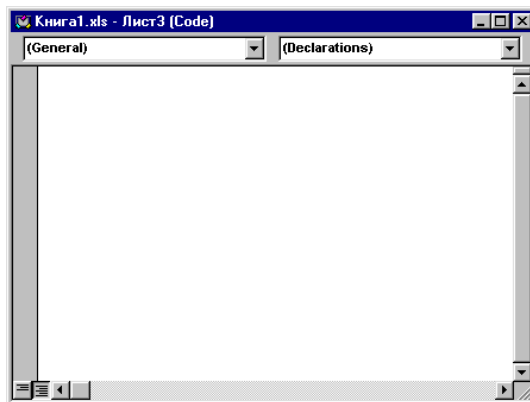


Рис. 1.4. Вікно редагування коду

Редактор коду також робить автоматичну перевірку синтаксису набраного рядка коду відразу після натискання клавіші <Enter>. Якщо після набору рядка й натискання клавіші <Enter> рядок виділяється червоним кольором, то це саме й указує на наявність синтаксичної помилки в набраному рядку. Цю помилку необхідно знайти й виправити.

Вікно редагування форм (Userform)

Для створення діалогових вікон, розроблення додатків в VBA використовуються форми. Редактор форм є одним з основних інструментів візуального програмування. Форма в проект додається за допомогою команди *Вставка, Форма* (Insert, Form) або натисканням кнопки *Вставити Userform* (Insert Userform). У результаті на екран виводиться незаповнена форма з панеллю інструментів *Панель елементів* (Toolbox) (рис. 1.5).

Вікно властивостей

У вікні властивостей перелічуються основні установки властивостей обраної форми або елемента керування. Використовуючи це вікно, можна переглядати властивості й змінювати їхні установки. Для перегляду властивостей обраного об'єкта треба вибрати команду *Вид, Вікно властивостей* (View, Properties Window) (рис. 1.6).

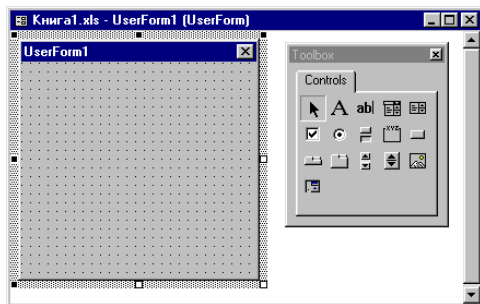


Рис. 1.5. Вікно редагування форм і панель інструментів Toolbox

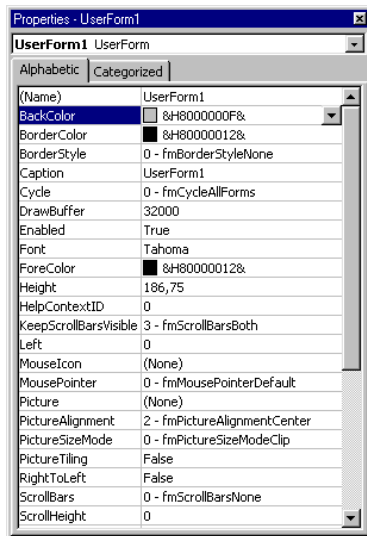


Рис. 1.6. Вікно властивостей

Нижче приводиться повний текст програми виконання розрахунків за допомогою математичної моделі «Індикаторний цикл» у вигляді коду середовища Visual Basic Applications (VBA).

```
Private Sub CommandButton1_Click()
    ДЦ = CDb1(TextBox1.Text)
    S = CDb1(TextBox2.Text)
    N = CDb1(TextBox3.Text)
    ED = CDb1(TextBox4.Text)
    AL = CDb1(TextBox5.Text)
    ГР = CDb1(TextBox6.Text)
    ЛІІІ = CDb1(TextBox7.Text)
    ФВС = CDb1(TextBox8.Text)
    ФПІ = CDb1(TextBox9.Text)
    LO = CDb1(TextBox10.Text)
    ФZ = CDb1(TextBox11.Text)
    M = CDb1(TextBox12.Text)
    ФK1 = CDb1(TextBox13.Text)
    TBBX = CDb1(TextBox14.Text)
    TBBD = CDb1(TextBox15.Text)
    TMBX = CDb1(TextBox16.Text)
    TMBD = CDb1(TextBox17.Text)
    QH = CDb1(TextBox18.Text)
    ALB = CDb1(TextBox19.Text)
    ALM = CDb1(TextBox20.Text)
    LM = CDb1(TextBox21.Text)
    DBT = CDb1(TextBox22.Text)
    DKP = CDb1(TextBox23.Text)
    ДПР = CDb1(TextBox24.Text)
    P1 = CDb1(TextBox25.Text)
    T1 = CDb1(TextBox26.Text)
    ДФK = CDb1(TextBox27.Text)

    'Cells(1, 20) = ДЦ

    '=====
    Range("A1:G182").Select
    Selection.ClearContents
    ActiveWindow.SmallScroll Down:=-27
    Range("A1").Select
    '=====

    L = LO * AL
    FЦ = 0.785 * ДЦ ^ 2
    VS = FЦ * S
    VC = VS / (ED - 1)
    CM = S * N / 30
    QЦ = 94.4 * ED * P1 * ДЦ ^ 2 * S / LO / T1 / (ED - 1) / AL
```

```

V1 = VC + 0.5 * FЦ * S * ((1 - Cos(ΦK1 * 3.14 / 180)) +
0.25 * ЛШ * (1 - Cos(2 * ΦK1 * 3.14 / 180)))
ΦK2 = ΦK1 + DΦK
V2 = VC + 0.5 * FЦ * S * ((1 - Cos(ΦK2 * 3.14 / 180)) +
0.25 * ЛШ * (1 - Cos(2 * ΦK2 * 3.14 / 180)))
‘T2 = T1

1  TГ = (T1 + T2) / 2
ΦСП1 = 360 - ΦBC
ΦСП2 = ΦСП1 + ΦZ

If (ΦK1 >= ΦСП1) And (ΦK1 <= ΦСП2) Then ‘
КП = 1

Else
КП = 0
End If
ΦП2 = КП * (ΦП1 + DΦK)
N1 = 6.908 * (ΦП1 / ΦZ) ^ (M + 1)
N2 = 6.908 * (ΦП2 / ΦZ) ^ (M + 1)
X1 = 1 - 1 / 2.7 ^ N1
X2 = 1 - 1 / 2.7 ^ N2
If X2 < X1 Then ‘
X2 = X1
End If

BTO = 1 + 0.066 / AL
BT1 = 1 + (BTO - 1) * X1 / (1 + ΓR)
BT2 = 1 + (BTO - 1) * X2 / (1 + ΓR)
P2 = P1 * V1 / V2 * BT2 / BT1 * T2 / T1
PГ = (P1 + P2) / 2
ALГ = 7,8 * CM ^ 0.33 * PГ ^ 0.5 * TГ ^ 0.5
DΦB = (V1 + V2) / 2 / FЦ * 3.14 * DЦ
DT = DΦK / 6 / N
TB = 273 + (TBBX + TBBD) / 2
TM = 273 + (TMBX + TMBD) / 2
AV1 = (22.024 * (1.064 * X1 + ΓR) + 20.474 * (AL * (1 + ΓR) - (X1 + ΓR)))
/ (AL * (1 + ΓR) + 0.064 * X1)
B1 = (0.0054 * (1.064 * X1 + ΓR) + 0.00376 * (AL * (1 + ΓR) - (X1 + ΓR)))
/ (AL * (1 + ΓR) + 0.064 * X1)
AV2 = (22.024 * (1.064 * X2 + ΓR) + 20.474 * (AL * (1 + ΓR) - (X2 + ΓR)))
/ (AL * (1 + ΓR) + 0.064 * X2)
B2 = (0.0054 * (1.064 * X2 + ΓR) + 0.00376 * (AL * (1 + ΓR) - (X2 + ΓR)))
/ (AL * (1 + ΓR) + 0.064 * X2)
CV1 = AV1 + B1 * T1
CV2 = AV2 + B2 * T2
DQПЛ1 = QЦ * QH * (X2 - X1)
DQB = (TГ - TB) / (1 / ALГ + DBT / LM + 1 / ALB) * DΦB * DT * 10 ^ -3
DQK = (TГ - TB) / (1 / ALГ + DKP / LM + 1 / ALB) * FЦ * DT * 10 ^ -3

```

```

DQP = (TG - TM) / (1 / ALG + DPP / LM + 1 / ALM) * FQ * DT * 10 ^ -3
N3 = DQPLI - DQB - DQK - DQP
N4 = QI * L * (1 + GR)
N5 = (CV1 - 4.157 * (V2 - V1) / V1) * BT1 * T1
N6 = (CV2 + 4.157 * (V2 - V1) / V2) * BT2
T22 = (N3 / N4 + N5) / N6

If Abs((T2 - T22)) > 1.0002 Then      ' / T22)
T2 = T22
GoTo 1
End If

Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 1) = ФК1
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 2) = P2
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 3) = T2
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 4) = DLJ
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 5) = DLJ1
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 6) = DQPLI
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 7) = DQB
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 8) = DQK
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 9) = DQP
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 10) = DQPLI1
Cells((ФК1 - 180) / 2 + 1, 11) = CV2

DLJ = ((P1 + P2) / 2) * (V2 - V1)
DLJ1 = DLJ + DLJ1
DQPLI1 = DQPLI + DQPLI1
T1 = T2
ФК1 = ФК2
ФП1 = ФП2
P1 = P2      'до ФК2=540
              'P2, T2
If ФК2 < 540 + 2 Then
GoTo 2
End If
PJ = DLJ1 / VS
GJ = 4.58 * QI / PJ / DQ ^ 2 / S
ETJ = 3600 / GJ / QH
TextBox28.Text = ETJ * 100
TextBox29.Text = PJ
TextBox30.Text = GJ
TextBox31.Text = QI

Cells(1, 20) = TextBox1.Text
Cells(2, 20) = TextBox2.Text
Cells(3, 20) = TextBox3.Text
Cells(4, 20) = TextBox4.Text
Cells(5, 20) = TextBox5.Text
Cells(6, 20) = TextBox6.Text
Cells(7, 20) = TextBox7.Text

```

```
Cells(8, 20) = TextBox8.Text  
Cells(9, 20) = TextBox9.Text  
Cells(10, 20) = TextBox10.Text  
Cells(11, 20) = TextBox11.Text  
Cells(12, 20) = TextBox12.Text  
Cells(13, 20) = TextBox13.Text  
Cells(14, 20) = TextBox14.Text  
Cells(15, 20) = TextBox15.Text  
Cells(16, 20) = TextBox16.Text  
Cells(17, 20) = TextBox17.Text  
Cells(18, 20) = TextBox18.Text  
Cells(19, 20) = TextBox19.Text  
Cells(20, 20) = TextBox20.Text  
Cells(21, 20) = TextBox21.Text  
Cells(22, 20) = TextBox22.Text  
Cells(23, 20) = TextBox23.Text  
Cells(24, 20) = TextBox24.Text  
Cells(25, 20) = TextBox25.Text  
Cells(26, 20) = TextBox26.Text  
Cells(27, 20) = TextBox27.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Label31_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
TextBox1.Text = Cells(1, 20)  
TextBox2.Text = Cells(2, 20)  
TextBox3.Text = Cells(3, 20)  
TextBox4.Text = Cells(4, 20)  
TextBox5.Text = Cells(5, 20)  
TextBox6.Text = Cells(6, 20)  
TextBox7.Text = Cells(7, 20)  
TextBox8.Text = Cells(8, 20)  
TextBox9.Text = Cells(9, 20)  
TextBox10.Text = Cells(10, 20)  
TextBox11.Text = Cells(11, 20)  
TextBox12.Text = Cells(12, 20)  
TextBox13.Text = Cells(13, 20)  
TextBox14.Text = Cells(14, 20)  
TextBox15.Text = Cells(15, 20)  
TextBox16.Text = Cells(16, 20)  
TextBox17.Text = Cells(17, 20)  
TextBox18.Text = Cells(18, 20)  
TextBox19.Text = Cells(19, 20)  
TextBox20.Text = Cells(20, 20)
```

```

TextBox21.Text = Cells(21, 20)
TextBox22.Text = Cells(22, 20)
TextBox23.Text = Cells(23, 20)
TextBox24.Text = Cells(24, 20)
TextBox25.Text = Cells(25, 20)
TextBox26.Text = Cells(26, 20)
TextBox27.Text = Cells(27, 20)
End Sub

```

1.3 Результати розрахункового дослідження за допомогою моделі індикаторного циклу («Індикаторний цикл»)

На рис. 1.7 показано вікно для вводу даних, необхідних для розрахунку. Обов'язковою умовою є введення початкових даних у точному порядку, який представлений у даному вікні редактору VBA.

В табличній формі (табл. 1.1) приведено фрагмент розрахунку деяких параметрів при моделюванні індикаторного циклу. Такими параметрами є:

P2 — тиск газів на початку першої розрахункової ділянки, МПа;

T2 — температура газів на початку першої розрахункової ділянки, К;

Розрахунок робочого процесу двигуна

Діаметр циліндра, Dц м	0,18	Температура охолоджуваної води на вході в двигун, TBBX	75
Хід поршня, S м	0,22	Температура охолоджуваної води на виході із двигуна, TBBD	85
Частота обертів колінчастого вала, N хв-1	1000	Температура циркуляційного масла на вході в двигун, TMBX	63
Дійсна ступінь стиску, ED	14	Температура циркуляційного масла на виході після охолодження, TMBD	72
Коефіцієнт надлишку повітря, AL	2,2	Нижча теплота згоряння умовного палива, QH кДж/кг	42700
Коефіцієнт залишкових газів, GR	0,02	Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні деталей циліндра до охолоджуючої води, ALB Вт/(м ² К)	2000
Стала КШМ, LШ	0,25	Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні поршня до циркуляційного масла, ALM Вт/(м ² К)	1000
Кут випередження спалаху, ФВС	20	Коефіцієнт теплопровідності матеріала деталей циліндра, LM Вт/(м К)	50
Кут повороту кришки від моменту спалаху до початку розрахункової ділянки, ФП1	0	Товщина стінки втулки циліндра, DBT м	0,01
Теоретично потрібна кількість повітря для спалення 1кг палива, L0	0,499	Товщина днища кришки, DKP м	0,012
Кут згоряння палива, ФZ	25	Товщина днища поршня, DTP м	0,012
Показник спалення, M	4	Тиск на початку розрахункової ділянки, P1 МПа	0,3
Кут поворота кришки на початку стиснення, ФК1	180	Температура на початку розрахункової ділянки, T1 К	340
		Крок розрахунку кривошипу при проходженні розрахункової ділянки. ДЕК год	2

КПД= 45,3669394251246

PJ= 2,01375263986278

GJ= 0,185838265833666

QC= 5,82429655691473E-04

Розрахувати

Рис. 1.7. Вікно вхідних даних

Dlj — зміна роботи газів на початку першої розрахункової ділянки, кДж;

Dlj1 — зміна роботи газів наприкінці першої розрахункової ділянки, кДж;

DQPL — втрати теплоти через днище поршня на початку першої розрахункової ділянки, кДж;

DQB — втрати теплоти через поверхню втулки на першій розрахунковій ділянці, кДж;

DQK — втрати теплоти через кришку циліндра на першій розрахунковій ділянці, кДж;

DQP — втрати теплоти через днище поршня наприкінці першої розрахункової ділянки, кДж;

CV2 — істинна ізохорна мольна теплоємність газу, кДж/(кмоль·К).

У першому стовбці таблиці вказані значення кута повороту колінчатого валу кривошипа в градусах.

При використанні даної моделі у таблицю можна вивести результати розрахунку близько ста досліджуваних параметрів, але формат аркуша не дозволяє це зробити. Кількість цих параметрів залежить від поставленої задачі при дослідженні.

Таблиця 1.1. Визначення залежності теплових втрат через стінки циліндра від кута повороту колінчастого валу двигуна

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQHL1	DQB	DQK	DQP	DQPL1	CV2
180	0,351	332,13			0	-0,11	-0,01	-0,003		21,756
182	0,351349	332,1301	-4,9E-05	-4,9E-05	0	-0,10964	-0,01029	-0,00337	0	21,75569
184	0,351621	332,1301	-0,00016	-0,00021	0	-0,10959	-0,01029	-0,00337	0	21,75569
186	0,352005	332,1301	-0,00026	-0,00047	0	-0,10951	-0,01029	-0,00337	0	21,75569
188	0,352503	332,1301	-0,00037	-0,00084	0	-0,10941	-0,0103	-0,00337	0	21,75569
190	0,353116	332,1301	-0,00048	-0,00133	0	-0,10927	-0,0103	-0,00337	0	21,75569
192	0,353847	332,1301	-0,0006	-0,00192	0	-0,10911	-0,01031	-0,00337	0	21,75569
194	0,354697	332,1301	-0,00071	-0,00263	0	-0,10892	-0,01031	-0,00337	0	21,75569
196	0,355672	332,1301	-0,00082	-0,00345	0	-0,10871	-0,01032	-0,00338	0	21,75569
198	0,356772	332,1301	-0,00094	-0,00439	0	-0,10846	-0,01033	-0,00338	0	21,75569
200	0,358004	332,1301	-0,00106	-0,00545	0	-0,10819	-0,01034	-0,00338	0	21,75569
202	0,35937	332,1301	-0,00118	-0,00663	0	-0,10789	-0,01035	-0,00338	0	21,75569
204	0,360876	332,1301	-0,0013	-0,00793	0	-0,10756	-0,01037	-0,00339	0	21,75569
206	0,362527	332,1301	-0,00143	-0,00937	0	-0,10719	-0,01038	-0,00339	0	21,75569
208	0,364329	332,1301	-0,00156	-0,01093	0	-0,1068	-0,0104	-0,00339	0	21,75569
210	0,366288	332,1301	-0,0017	-0,01263	0	-0,10637	-0,01041	-0,0034	0	21,75569
212	0,368411	332,1301	-0,00184	-0,01446	0	-0,10591	-0,01043	-0,0034	0	21,75569
214	0,370706	332,1301	-0,00198	-0,01644	0	-0,10542	-0,01045	-0,00341	0	21,75569
216	0,37318	332,1301	-0,00213	-0,01857	0	-0,1049	-0,01047	-0,00341	0	21,75569
218	0,375842	332,1301	-0,00228	-0,02084	0	-0,10434	-0,01049	-0,00342	0	21,75569
220	0,379848	333,1356	-0,00243	-0,02328	0	-0,10132	-0,01027	-0,00324	0	21,7595
222	0,384152	334,2037	-0,0026	-0,02588	0	-0,09571	-0,00979	-0,00287	0	21,76354
224	0,388772	335,337	-0,00277	-0,02865	0	-0,08981	-0,00928	-0,00248	0	21,76783
226	0,393727	336,5379	-0,00296	-0,03161	0	-0,08361	-0,00872	-0,00205	0	21,77238
228	0,399036	337,8093	-0,00315	-0,03476	0	-0,07712	-0,00813	-0,0016	0	21,77719
230	0,404723	339,1541	-0,00335	-0,0381	0	-0,07032	-0,0075	-0,00112	0	21,78228

Продовження таблиці І.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQPL1	DQB	DQK	DQP	DQPL1	CV2
232	0,410812	340,5752	-0,00355	-0,04165	0	-0,06322	-0,00682	-0,00061	0	21,78766
234	0,417328	342,076	-0,00377	-0,04542	0	-0,0558	-0,0061	-6,5E-05	0	21,79335
236	0,424301	343,6597	-0,00399	-0,04941	0	-0,04809	-0,00533	0,000515	0	21,79934
238	0,431761	345,3299	-0,00422	-0,05363	0	-0,04006	-0,0045	0,001133	0	21,80566
240	0,439743	347,0903	-0,00447	-0,0581	0	-0,03172	-0,00362	0,001791	0	21,81233
242	0,448282	348,9449	-0,00472	-0,06282	0	-0,02308	-0,00267	0,00249	0	21,81935
244	0,45742	350,8978	-0,00499	-0,06781	0	-0,01414	-0,00166	0,003235	0	21,82674
246	0,4672	352,9534	-0,00527	-0,07308	0	-0,00489	-0,00059	0,004026	0	21,83452
248	0,47767	355,1161	-0,00556	-0,07863	0	0,00466	0,000568	0,004868	0	21,84271
250	0,488882	357,391	-0,00586	-0,08449	0	0,014499	0,001801	0,005764	0	21,85132
252	0,500895	359,7831	-0,00618	-0,09067	0	0,024624	0,00312	0,006716	0	21,86038
254	0,513771	362,2977	-0,00651	-0,09718	0	0,035027	0,004531	0,007729	0	21,8699
256	0,52758	364,9405	-0,00685	-0,10403	0	0,045699	0,00604	0,008807	0	21,8799
258	0,542398	367,7176	-0,00722	-0,11125	0	0,05663	0,007655	0,009953	0	21,89042
260	0,55831	370,6354	-0,0076	-0,11885	0	0,067805	0,009384	0,011172	0	21,90146
262	0,575409	373,7005	-0,008	-0,12684	0	0,079213	0,011235	0,012469	0	21,91307
264	0,593799	376,9202	-0,00841	-0,13526	0	0,090835	0,013218	0,013849	0	21,92526
266	0,613592	380,3019	-0,00885	-0,14411	0	0,102656	0,015342	0,015318	0	21,93806
268	0,634917	383,8538	-0,00931	-0,15342	0	0,114654	0,017619	0,016881	0	21,95151
270	0,657915	387,5843	-0,0098	-0,16322	0	0,126808	0,02006	0,018545	0	21,96563
272	0,682741	391,5026	-0,0103	-0,17352	0	0,139095	0,022678	0,020316	0	21,98046
274	0,709573	395,6183	-0,01084	-0,18436	0	0,151487	0,025487	0,022202	0	21,99604
276	0,738605	399,9416	-0,0114	-0,19576	0	0,163957	0,028502	0,024211	0	22,01241
278	0,770058	404,4835	-0,01199	-0,20775	0	0,176473	0,031739	0,026351	0	22,0296
280	0,804176	409,2557	-0,01261	-0,22036	0	0,189003	0,035215	0,028632	0	22,04767
282	0,841237	414,2706	-0,01327	-0,23362	0	0,20151	0,03895	0,031061	0	22,06666

Продовження таблиці 1.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQHL1	DQB	DQK	DQH	DQPL1	CV2
284	0,881552	419,5413	-0,01396	-0,24758	0	0,213958	0,042964	0,033651	0	22,08661
286	0,925471	425,0821	-0,01469	-0,26227	0	0,226304	0,04728	0,036411	0	22,10759
288	0,973392	430,908	-0,01546	-0,27773	0	0,238507	0,05192	0,039355	0	22,12964
290	1,025764	437,0349	-0,01627	-0,294	0	0,25052	0,056912	0,042493	0	22,15284
292	1,083095	443,48	-0,01713	-0,31114	0	0,262298	0,062283	0,04584	0	22,17724
294	1,145964	450,2615	-0,01804	-0,32918	0	0,273789	0,068064	0,04941	0	22,20291
296	1,215028	457,3986	-0,01901	-0,34819	0	0,284942	0,074285	0,053218	0	22,22993
298	1,291036	464,9119	-0,02003	-0,36822	0	0,295705	0,080983	0,05728	0	22,25837
300	1,374844	472,823	-0,02111	-0,38933	0	0,306022	0,088194	0,061614	0	22,28832
302	1,467426	481,155	-0,02226	-0,41158	0	0,315837	0,095957	0,066236	0	22,31986
304	1,5699	489,9319	-0,02347	-0,43505	0	0,325095	0,104315	0,071167	0	22,35309
306	1,683542	499,179	-0,02475	-0,4598	0	0,333738	0,113312	0,076426	0	22,3881
308	1,809811	508,9224	-0,02611	-0,48592	0	0,341711	0,122994	0,082033	0	22,42498
310	1,950377	519,1893	-0,02755	-0,51347	0	0,348958	0,133409	0,08801	0	22,46385
312	2,107148	530,007	-0,02908	-0,54255	0	0,355428	0,144607	0,094377	0	22,5048
314	2,277853	540,3484	-0,03068	-0,57323	0	0,359952	0,156134	0,100863	0	22,54395
316	2,46843	551,2004	-0,03234	-0,60557	0	0,362553	0,16797	0,107452	0	22,58504
318	2,681475	562,5803	-0,03405	-0,63962	0	0,364273	0,180607	0,114427	0	22,62812
320	2,919891	574,5024	-0,03583	-0,67544	0	0,36509	0,194077	0,121803	0	22,67325
322	3,186895	586,9769	-0,03767	-0,71311	0	0,364991	0,208411	0,129588	0	22,72048
324	3,485997	600,0081	-0,03956	-0,75268	0	0,363972	0,22363	0,13779	0	22,76981
326	3,820957	613,5918	-0,04149	-0,79417	0	0,362042	0,239746	0,14641	0	22,82124
328	4,195684	627,7128	-0,04344	-0,83761	0	0,359224	0,256754	0,155442	0	22,87469
330	4,614062	642,3412	-0,04535	-0,88296	0	0,355556	0,274633	0,164872	0	22,93007
332	5,079684	657,4282	-0,0472	-0,93016	0	0,351095	0,293335	0,174671	0	22,98719
334	5,595435	672,901	-0,04892	-0,97908	0	0,345915	0,312782	0,184799	0	23,04576

Продовження таблиці 1.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQPL1	DQB	DQK	DQP	DQPL1	CV2
336	6,162909	688,657	-0,05042	-1,0295	0	0,340115	0,332855	0,195194	0	23,10541
338	6,781621	704,558	-0,05161	-1,08112	0	0,33381	0,353388	0,205772	0	23,16561
340	7,44803	720,4263	-0,05237	-1,13349	0,009265	0,327142	0,37416	0,216422	0	23,22569
342	8,155185	736,1113	-0,05255	-1,18604	0,287199	0,320308	0,394933	0,227027	0,009265	23,28514
344	8,894718	751,7296	-0,05198	-1,23802	1,9543	0,313681	0,415625	0,23756	0,296464	23,34479
346	9,660906	767,9681	-0,05051	-1,28853	7,226001	0,307977	0,436645	0,248253	2,250764	23,40824
348	10,45616	786,3707	-0,04799	-1,33653	19,379	0,304386	0,459254	0,259788	9,476765	23,48324
350	11,29675	809,5526	-0,04435	-1,38088	42,59018	0,304648	0,485889	0,273465	28,85577	23,58294
352	12,21601	841,2293	-0,03954	-1,42041	81,49548	0,311072	0,520343	0,29128	71,44594	23,72624
354	13,27618	886,9429	-0,03353	-1,45395	140,2284	0,326833	0,568268	0,316185	152,9414	23,94098
356	14,51358	950,5186	-0,0263	-1,48024	220,6916	0,355183	0,635542	0,351206	293,1698	24,25054
358	15,94112	1034,756	-0,01763	-1,49788	320,0274	0,398874	0,726526	0,398537	513,8614	24,67582
360	17,5036	1138,784	-0,00719	-1,50506	427,8519	0,459865	0,842764	0,458887	833,8888	25,22279
362	19,04128	1255,505	0,005455	-1,49961	524,8502	0,537733	0,979581	0,529761	1261,741	25,8675
364	20,35249	1374,665	0,020532	-1,47908	585,2607	0,629497	1,126183	0,605576	1786,591	26,56185
366	21,21373	1482,67	0,037787	-1,44129	585,26	0,729765	1,26741	0,678578	2371,852	27,22892
368	21,46891	1567,22	0,056296	-1,38499	515,711	0,831204	1,38663	0,740307	2957,112	27,78563
370	21,08676	1621,13	0,074539	-1,31045	391,9086	0,926723	1,471231	0,784372	3472,823	28,17145
372	20,17378	1644,825	0,090825	-1,21963	250,4018	1,011838	1,51677	0,80854	3864,731	28,37342
374	18,89858	1643,171	0,103862	-1,11577	130,6144	1,085372	1,526589	0,814526	4115,133	28,41712
376	17,46631	1626,018	0,113088	-1,00268	53,79124	1,149827	1,510113	0,807131	4245,747	28,36178
378	16,02011	1601,149	0,118722	-0,88396	16,84455	1,209922	1,47864	0,792111	4299,539	28,25758
380	14,64062	1573,501	0,121475	-0,76248	3,846115	1,269481	1,440337	0,773621	4316,383	28,13594
382	13,35938	1545,139	0,122095	-0,64039	0	1,330596	1,399714	0,753954	4320,229	28,00964
384	12,16933	1514,819	0,121171	-0,51922	0	1,39254	1,357366	0,733395	4320,229	26,23305
386	11,08974	1485,051	0,119043	-0,40017	0	1,454978	1,314149	0,71237	4320,229	26,12036

Продовження таблиці 1.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQHL1	DQB	DQK	DQH	DQPL1	CV2
388	10,1153	1455,987	0,116018	-0,28415	0	1,518789	1,271781	0,691752	4320,229	26,01033
390	9,238803	1427,737	0,112426	-0,17173	0	1,583561	1,230463	0,671635	4320,229	25,90338
392	8,452162	1400,372	0,108454	-0,06327	0	1,648915	1,190339	0,652088	4320,229	25,79979
394	7,747052	1373,939	0,104254	0,040979	0	1,714508	1,151505	0,633154	4320,229	25,69972
396	7,115332	1348,461	0,09994	0,140919	0	1,780029	1,114024	0,614862	4320,229	25,60326
398	6,549305	1323,944	0,095598	0,236518	0	1,845199	1,077929	0,597227	4320,229	25,51045
400	6,041854	1300,382	0,091294	0,327812	0	1,909767	1,043229	0,580252	4320,229	25,42125
402	5,590694	1278,721	0,087074	0,414886	0	1,974592	1,010501	0,564239	4320,229	25,33925
404	5,185007	1257,904	0,083	0,497886	0	2,03958	0,979674	0,549152	4320,229	25,26044
406	4,819718	1237,911	0,07909	0,576976	0	2,103446	0,950094	0,534651	4320,229	25,18475
408	4,490315	1218,717	0,075324	0,6523	0	2,16603	0,921734	0,520721	4320,229	25,11208
410	4,192799	1200,297	0,07171	0,72401	0	2,227193	0,894561	0,507347	4320,229	25,04235
412	3,923635	1182,622	0,068252	0,792262	0	2,286818	0,868541	0,494514	4320,229	24,97544
414	3,679707	1165,667	0,06495	0,857212	0	2,344801	0,843635	0,482202	4320,229	24,91125
416	3,458267	1149,401	0,061803	0,919014	0	2,401059	0,819804	0,470395	4320,229	24,84967
418	3,256896	1133,798	0,058806	0,97782	0	2,455521	0,797008	0,459072	4320,229	24,7906
420	3,073461	1118,831	0,055955	1,033775	0	2,508132	0,775208	0,448217	4320,229	24,73394
422	2,906083	1104,471	0,053245	1,08702	0	2,558848	0,754363	0,43781	4320,229	24,67958
424	2,753101	1090,695	0,050668	1,137688	0	2,607637	0,734434	0,427835	4320,229	24,62743
426	2,61305	1077,477	0,04822	1,185909	0	2,65448	0,715385	0,418273	4320,229	24,57739
428	2,484636	1064,793	0,045894	1,231803	0	2,699363	0,697176	0,409109	4320,229	24,52937
430	2,366711	1052,62	0,043683	1,275486	0	2,742284	0,679773	0,400325	4320,229	24,48328
432	2,258257	1040,937	0,041581	1,317067	0	2,783249	0,663141	0,391906	4320,229	24,43906
434	2,15837	1029,722	0,039583	1,356651	0	2,822269	0,647246	0,383837	4320,229	24,3966
436	2,066247	1018,956	0,037683	1,394334	0	2,859364	0,632056	0,376103	4320,229	24,35584
438	1,981172	1008,62	0,035875	1,430209	0	2,894555	0,61754	0,368691	4320,229	24,31671

Продовження таблиці 1.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQPL1	DQB	DQK	DQP	DQPL1	CV2
440	1,902506	998,6951	0,034154	1,464363	0	2,927874	0,603668	0,361587	4320,229	24,27914
442	1,829677	989,1647	0,032516	1,496878	0	2,959352	0,590412	0,354779	4320,229	24,24306
444	1,762174	980,0122	0,030955	1,527833	0	2,989027	0,577744	0,348254	4320,229	24,20841
446	1,699538	971,2221	0,029468	1,557301	0	3,016939	0,56564	0,342	4320,229	24,17513
448	1,641357	962,7795	0,02805	1,58535	0	3,043131	0,554073	0,336007	4320,229	24,14317
450	1,58726	954,6703	0,026697	1,612048	0	3,067646	0,54302	0,330263	4320,229	24,11247
452	1,536913	946,8808	0,025407	1,637454	0	3,090534	0,532458	0,324759	4320,229	24,08298
454	1,490015	939,3983	0,024175	1,66163	0	3,111841	0,522366	0,319485	4320,229	24,05466
456	1,446292	932,2106	0,022999	1,684628	0	3,131617	0,512723	0,314431	4320,229	24,02744
458	1,405499	925,3058	0,021875	1,706504	0	3,149912	0,503509	0,309588	4320,229	24,00131
460	1,367409	918,6728	0,020802	1,727305	0	3,166778	0,494705	0,304947	4320,229	23,97619
462	1,331822	912,301	0,019775	1,747081	0	3,182265	0,486293	0,300502	4320,229	23,95207
464	1,29855	906,1801	0,018794	1,765874	0	3,196424	0,478257	0,296243	4320,229	23,9289
466	1,266042	899,3168	0,017855	1,783729	0	3,206607	0,470072	0,291874	4320,229	23,90292
468	1,235646	892,737	0,016947	1,800676	0	3,211278	0,461755	0,287406	4320,229	23,87801
470	1,20721	886,429	0,01607	1,816747	0	3,215468	0,453825	0,283135	4320,229	23,85413
472	1,180595	880,3816	0,015233	1,831979	0	3,218694	0,446266	0,279052	4320,229	23,83123
474	1,155674	874,584	0,014432	1,846412	0	3,221007	0,439059	0,275149	4320,229	23,80929
476	1,132332	869,026	0,013667	1,860079	0	3,222459	0,432189	0,271419	4320,229	23,78824
478	1,110462	863,6978	0,012935	1,873014	0	3,223098	0,425639	0,267854	4320,229	23,76807
480	1,089965	858,5901	0,012235	1,885248	0	3,22297	0,419396	0,264447	4320,229	23,74874
482	1,070753	853,6941	0,011565	1,896813	0	3,22212	0,413445	0,261191	4320,229	23,7302
484	1,052743	849,0012	0,010924	1,907737	0	3,220591	0,407773	0,258081	4320,229	23,71244
486	1,035859	844,5034	0,01031	1,918047	0	3,218425	0,402367	0,255109	4320,229	23,69541
488	1,02003	840,1931	0,009722	1,927769	0	3,21566	0,397215	0,252271	4320,229	23,67909
490	1,005194	836,0627	0,009159	1,936927	0	3,212334	0,392306	0,24956	4320,229	23,66345

Закінчення таблиці 1.1

ФК1	P2	T2	Dij	Dij1	DQHL1	DQB	DQK	DQP	DQPL1	CV2
492	0,991289	832,1053	0,008619	1,945546	0	3,208484	0,38763	0,246971	4320,229	23,64847
494	0,978261	828,3143	0,008102	1,933648	0	3,204142	0,383175	0,244499	4320,229	23,63412
496	0,96606	824,6832	0,007606	1,961254	0	3,199342	0,378933	0,24214	4320,229	23,62037
498	0,954639	821,206	0,00713	1,968383	0	3,194113	0,374894	0,239888	4320,229	23,60721
500	0,943954	817,8769	0,006673	1,975057	0	3,188485	0,371049	0,237741	4320,229	23,59461
502	0,933966	814,6905	0,006235	1,981291	0	3,182485	0,367391	0,235692	4320,229	23,58254
504	0,924638	811,6416	0,005813	1,987104	0	3,176139	0,363911	0,233739	4320,229	23,571
506	0,915935	808,7253	0,005408	1,992512	0	3,169471	0,360602	0,231878	4320,229	23,55996
508	0,907827	805,937	0,005018	1,99753	0	3,162503	0,357458	0,230106	4320,229	23,54941
510	0,900285	803,2724	0,004643	2,002173	0	3,155258	0,354471	0,228419	4320,229	23,53932
512	0,893282	800,7274	0,004281	2,006454	0	3,147755	0,351637	0,226814	4320,229	23,52968
514	0,886794	798,2982	0,003932	2,010386	0	3,140013	0,348949	0,225288	4320,229	23,52049
516	0,880799	795,9813	0,003594	2,01398	0	3,13205	0,346402	0,223839	4320,229	23,51172
518	0,875277	793,7734	0,003268	2,017248	0	3,123882	0,343991	0,222465	4320,229	23,50336
520	0,87021	791,6715	0,002951	2,020199	0	3,115524	0,341712	0,221162	4320,229	23,4954
522	0,865582	789,673	0,002644	2,022844	0	3,106991	0,339561	0,219929	4320,229	23,48783
524	0,861377	787,7752	0,002346	2,02519	0	3,098295	0,337534	0,218765	4320,229	23,48065
526	0,857583	785,9761	0,002055	2,027244	0	3,08945	0,335628	0,217666	4320,229	23,47384
528	0,854188	784,2736	0,001771	2,029015	0	3,080465	0,33384	0,216633	4320,229	23,46739
530	0,851183	782,6661	0,001493	2,030508	0	3,071351	0,332166	0,215663	4320,229	23,46131
532	0,84856	781,1522	0,00122	2,031728	0	3,062118	0,330606	0,214755	4320,229	23,45558
534	0,846311	779,7306	0,000951	2,032679	0	3,052774	0,329156	0,213908	4320,229	23,45019
536	0,844432	778,4005	0,000687	2,033366	0	3,043327	0,327816	0,213122	4320,229	23,44516
538	0,842919	777,1613	0,000425	2,03379	0	3,033785	0,326584	0,212396	4320,229	23,44047
540	0,841769	776,0124	0,000165	2,033955	0	3,024152	0,325459	0,211729	4320,229	23,43612

Результати дослідження можуть також бути представлені у вигляді графіків (рис. 1.8...1.26) на прикладах для двотактного двигуна.

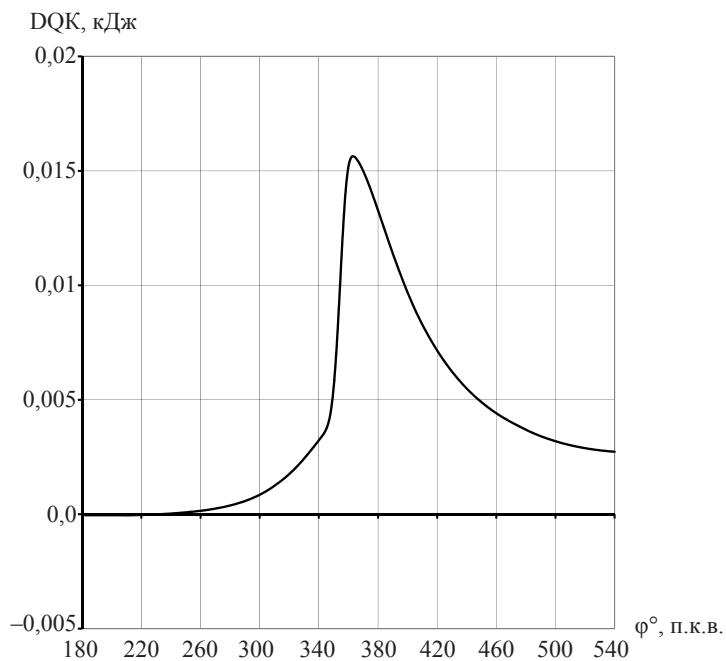


Рис. 1.8. Залежність втрати теплоти через кришку циліндра на тактах стиснення та розширення газів

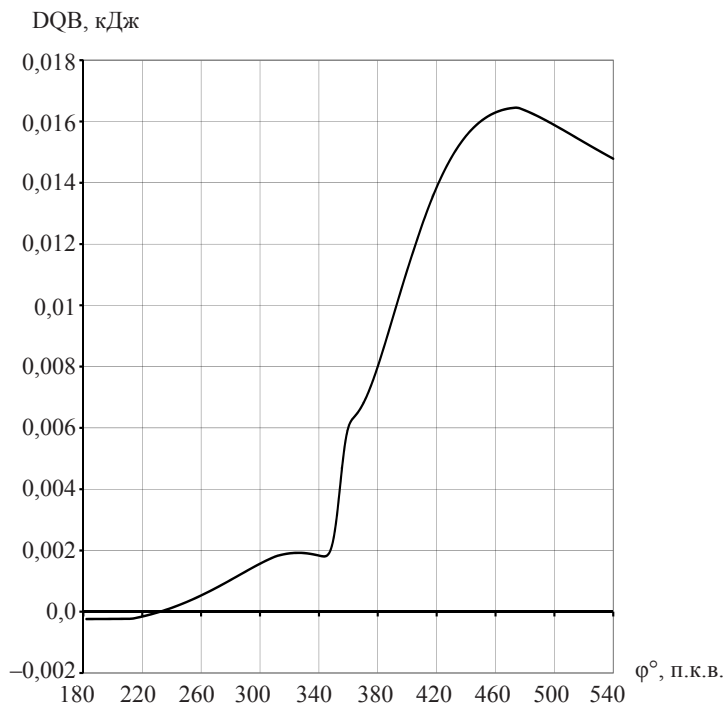


Рис. 1.9. Залежність втрати теплоти через втулку циліндра на тактах стиснення та розширення газів

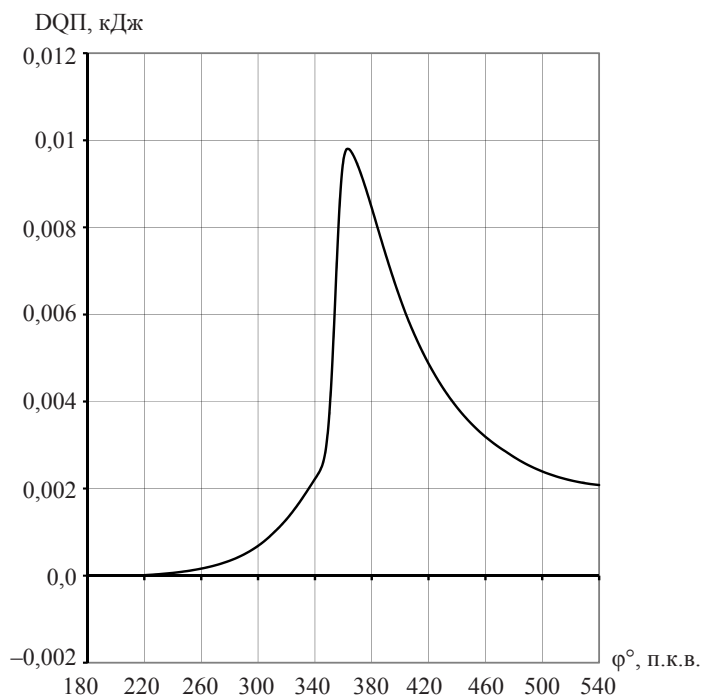


Рис. 1.10. Залежність втрати теплоти через поршень циліндра на тактах стиснення та розширення газів

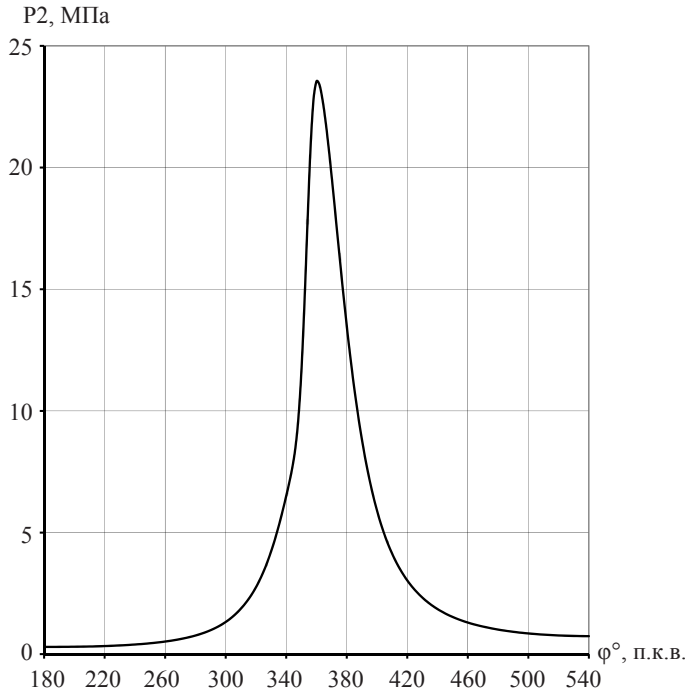


Рис. 1.11. Залежність тиску газів в циліндрі на тактах стиснення та розширення газів

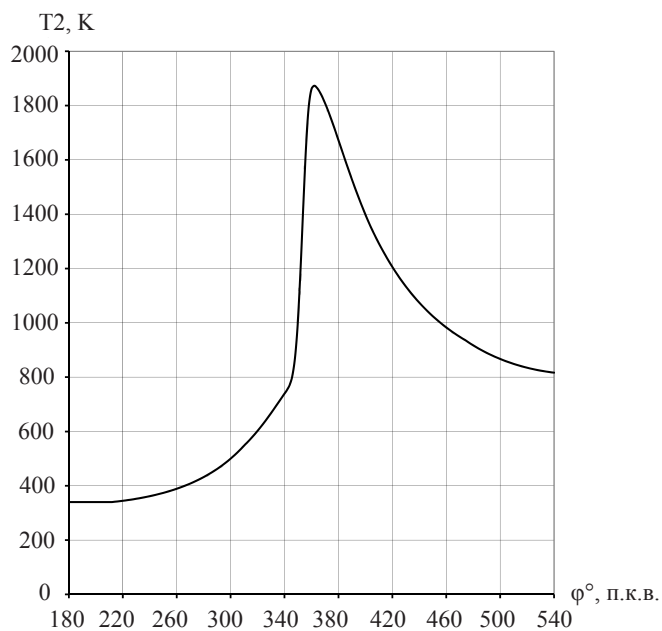


Рис. 1.12. Залежність температури газів в циліндрі на тактах стиснення та розширення газів

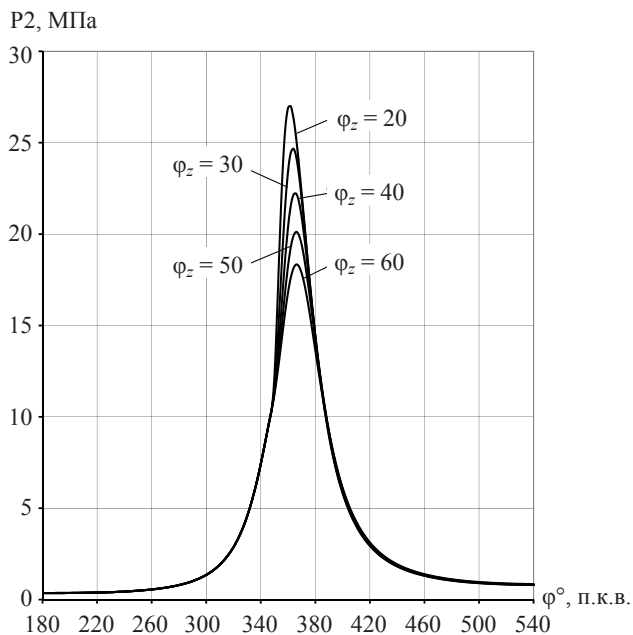


Рис. 1.13. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів згоряння палива $\varphi_z, ^\circ$

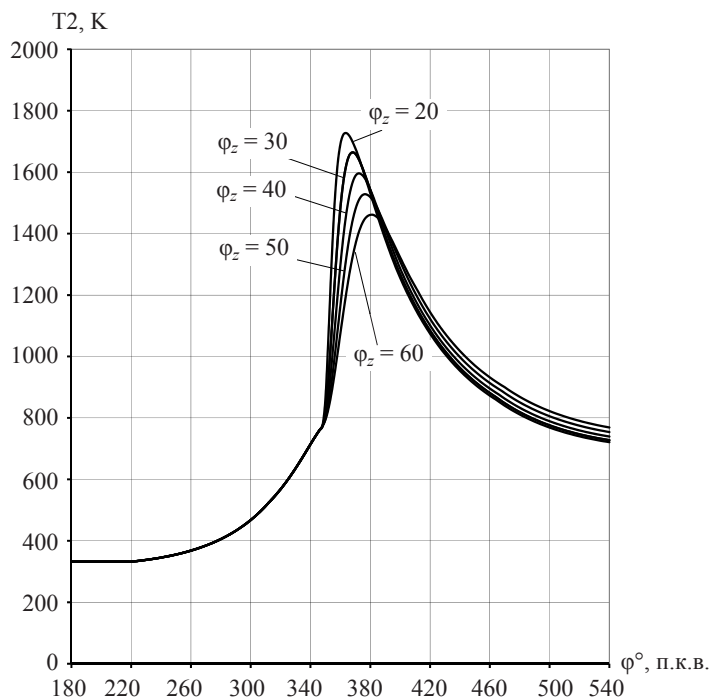


Рис. 1.14. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів згоряння палива φ_z , °

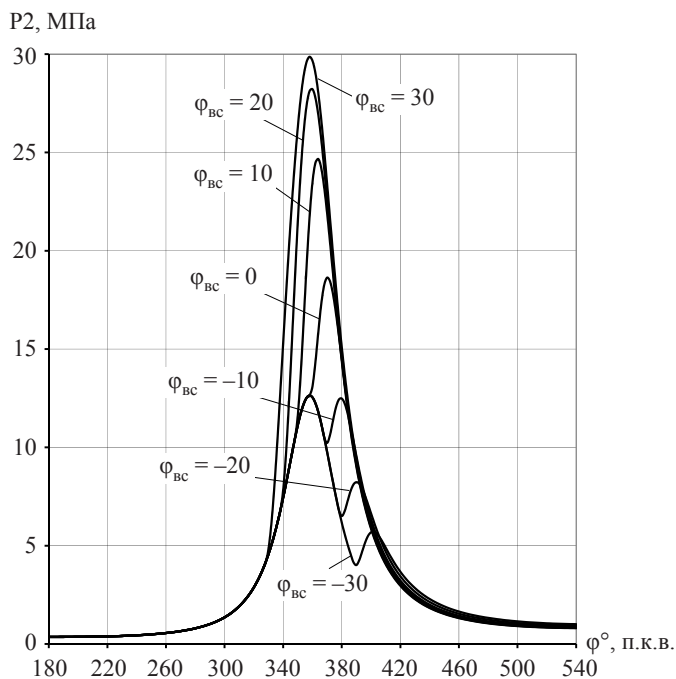


Рис. 1.15. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 30^\circ$

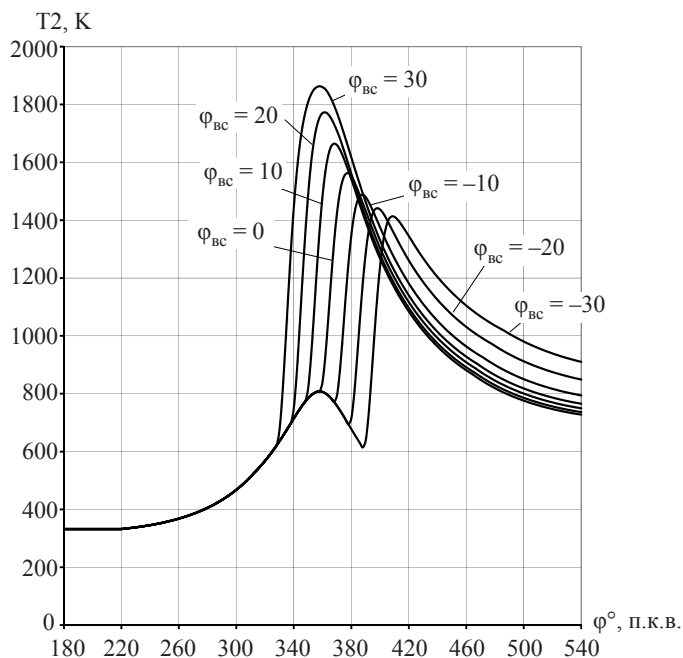


Рис. 1.16. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 30^\circ$

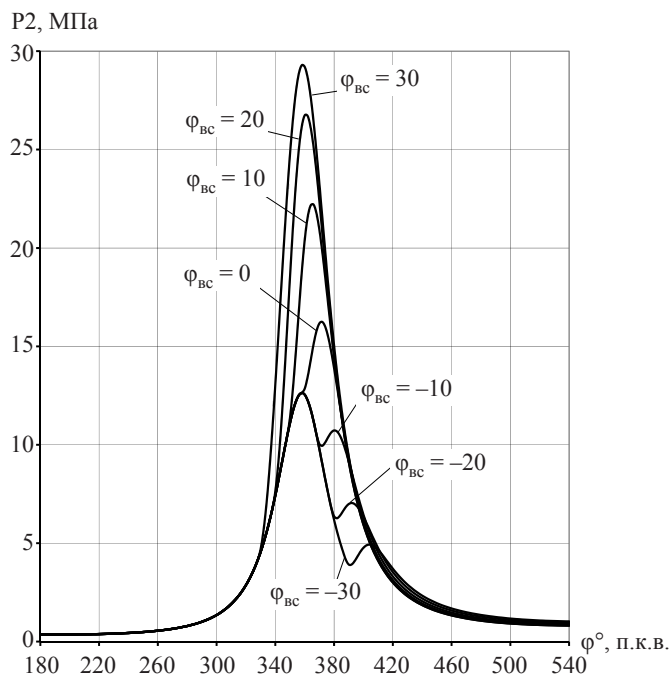


Рис. 1.17. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 40^\circ$

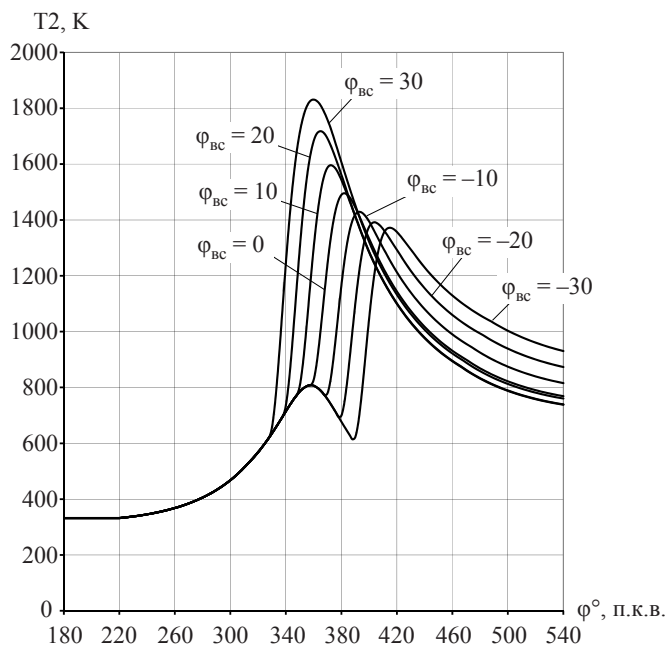


Рис. 1.18. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\phi_z = 40^\circ$

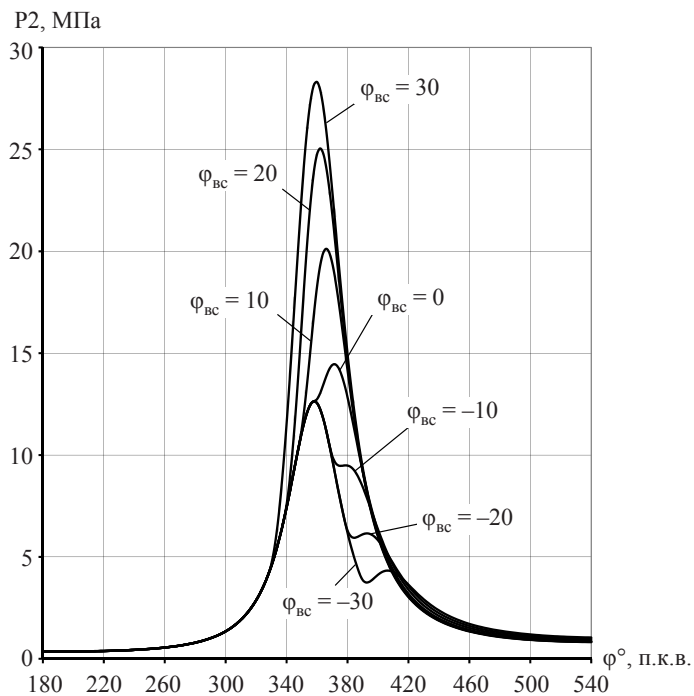


Рис. 1.19. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\phi_z = 50^\circ$

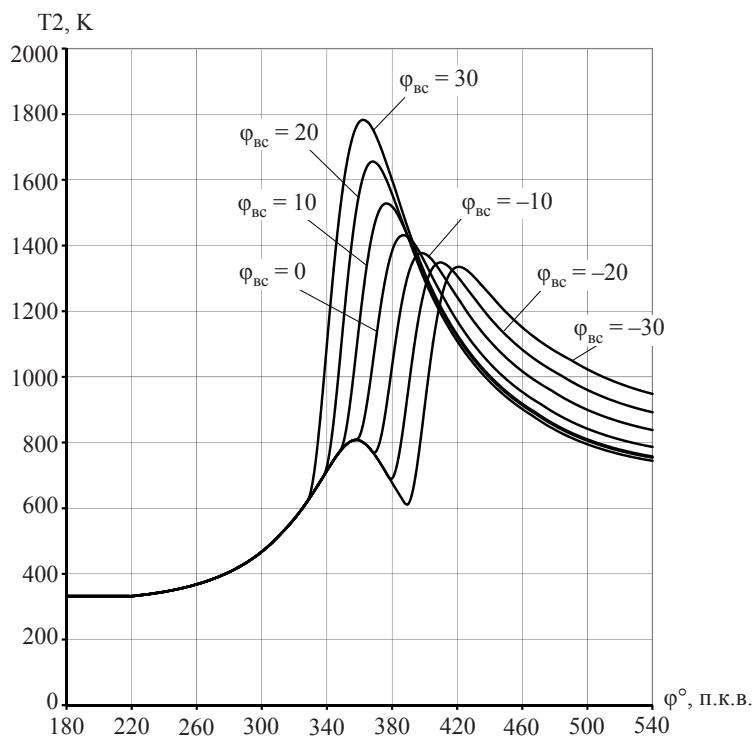


Рис. 1.20. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних кутів випередження спалаху та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

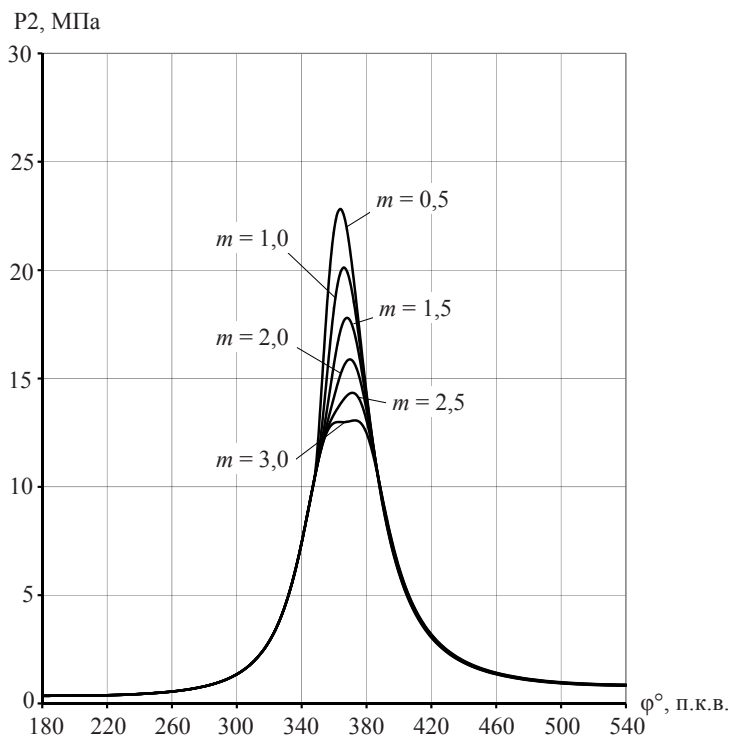


Рис. 1.21. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень показника якості згоряння m та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

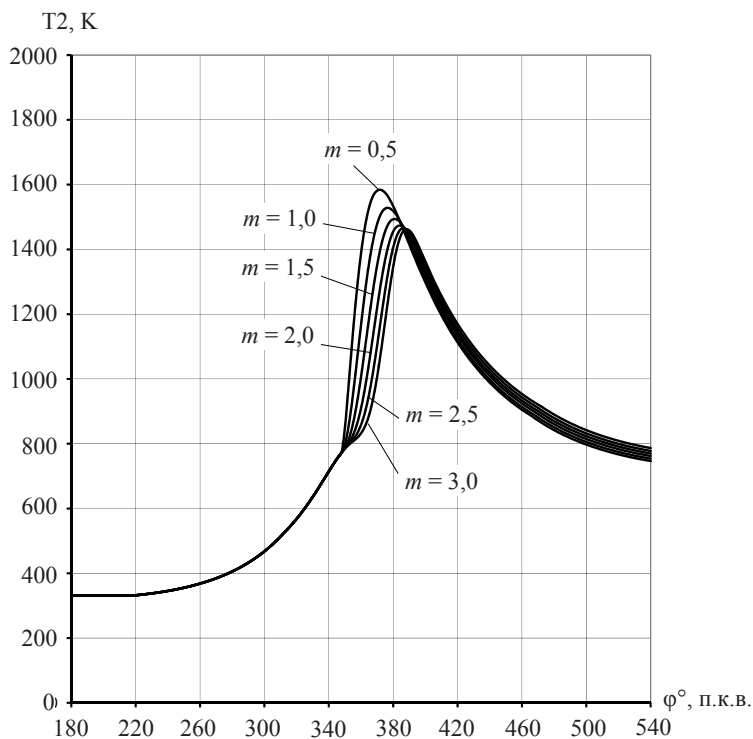


Рис. 1.22. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень показника якості згоряння m та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

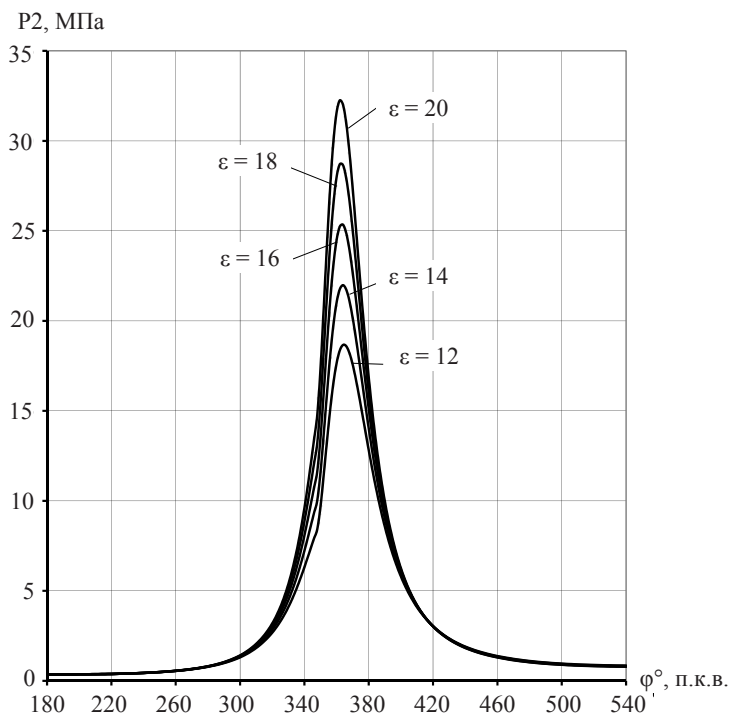


Рис. 1.23. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень ступеня стиснення ϵ та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

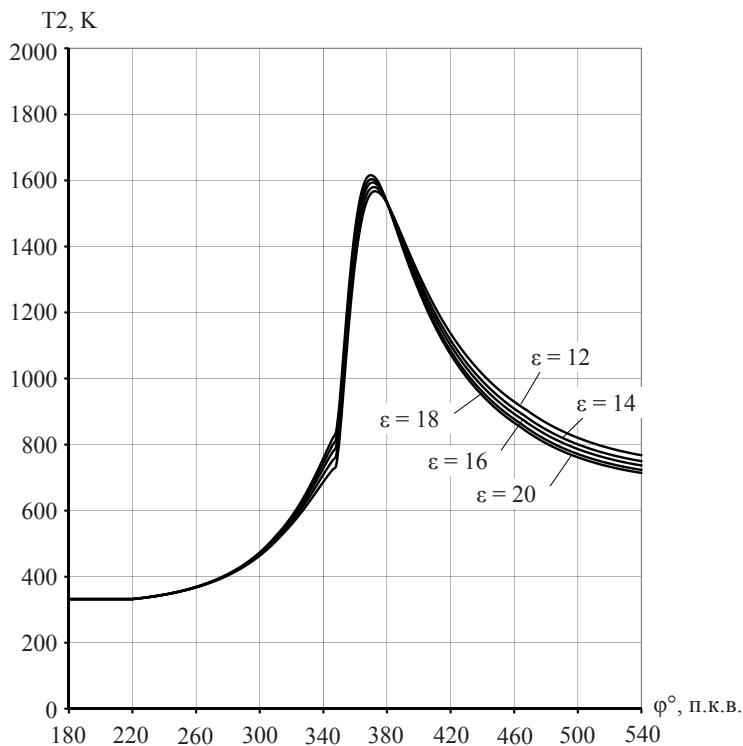


Рис. 1.24. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень ступеня стиснення ε та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

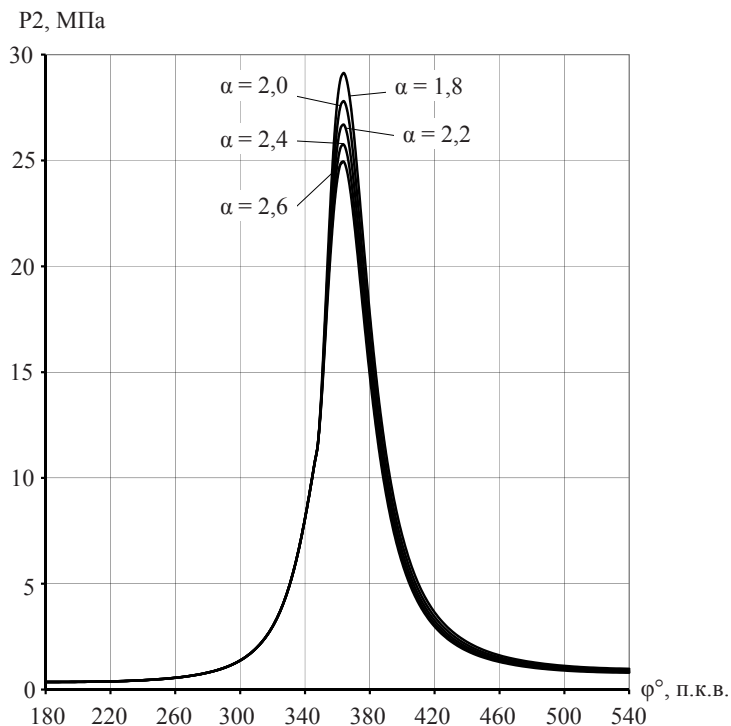


Рис. 1.25. Залежність тиску газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень коефіцієнта надлишку повітря α та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

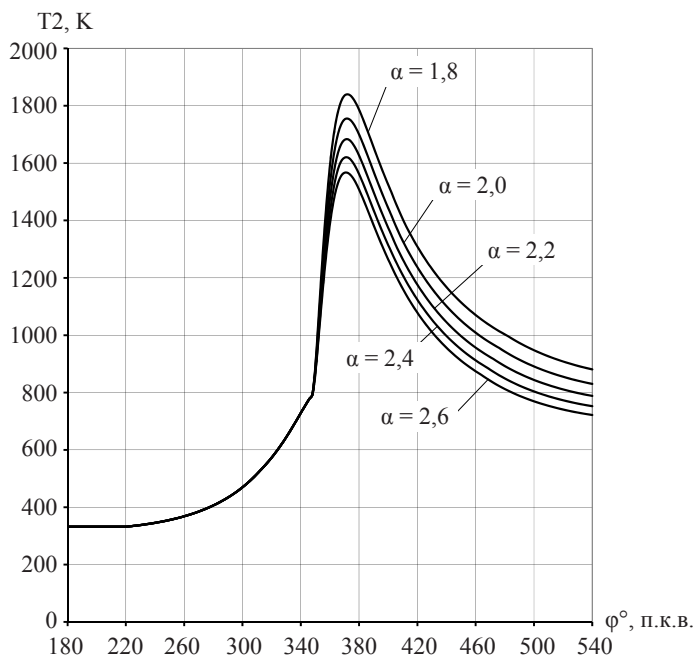


Рис. 1.26. Залежність температури газів в циліндрі від кута повороту колінчатого валу для різних значень коефіцієнта надлишку повітря α та постійному куті згоряння палива $\varphi_z = 50^\circ$

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Які основні причини змусили змінити спосіб проектування ДВЗ, тобто перейти з «ручного» на «комп'ютерне»?
2. Який додатковий етап вводиться у процес комп'ютерного проектування?
3. Назвіть основні складові процесу комп'ютерного проектування.
4. Що таке моделювання і яка його мета при комп'ютерному проектуванні?
5. За рахунок чого скорочується процес створення двигунів при комп'ютерному проектуванні?
6. За рахунок чого складається процес створення двигунів при комп'ютерному проектуванні?
7. Що таке математична модель (наприклад, при моделюванні термодинамічного процесу)?
8. Що таке математична модель?
9. Наведіть блок-схему математичної моделі.
10. Назвіть приблизну кількість параметрів, які досліджуються в математичній моделі «Індикаторний цикл».
11. Приведіть фрагмент коду програми при дослідженні зміни коефіцієнтів тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні втулки (наприклад, при заміні формули Ейхельберга формулою Семенова).

2 ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ІНДИКАТОРНИЙ ЦИКЛ» ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

Матеріал цього розділу виходить за межі бакалаврської підготовки. Його слід використовувати при виконанні науково-дослідної частини дипломної роботи, яку виконують студенти для здобуття кваліфікаційного рівня «магістр».

2.1. Мета створення математичної моделі «Індикаторний цикл»

Більшість відомих розрахункових робіт мають один недолік — малу точність розрахунків, що пов'язано з великою кількістю коефіцієнтів, які рекомендовано вводити в розрахунок робочого процесу з метою коригування результатів в бік наближення їх до параметрів реальних двигунів. Наприклад, в розрахунках робочого процесу за методом Гріневецького–Мазінга таких коефіцієнтів використовується від десяти до двадцяти. А якщо звернути увагу, що розбіжності в результатах можуть змінюватись в межах 50...100 %, то довіра до розрахунків практично дорівнює 50...60 %.

Це не означає, що слід відмовитись від використання таких методів в навчальному процесі. Навпаки, ці методи слід використовувати в якості ескізних.

Серед математичних моделей, які створені на кафедрі СМЕ ХФ НУК, на наш погляд, модель «Індикаторний цикл» є найбільш вдалою.

Позитивні якості математичної моделі такі:

- ця модель дозволяє дослідити біля ста параметрів;
- модель побудована таким чином, що в вихідні дані для розрахунків введено мінімальну кількість коефіцієнтів, які направлені на зближення розрахункових результатів з даними, які отримані при експлуатації реальних двигунів. Слід нагадати, що при старих методах розрахунків додатково вводяться біля тридцяти коефіцієнтів, які наближують результати;
- модель дає можливість підвищити точність розрахунків. Це підтверджується зіставленням результатів, отриманих шляхом моделювання, з реальними даними двигунів. Слід підкреслити, що модель будувалась без

прив'язки до конкретного двигуна. І тільки після завершення створення моделі було вперше проведено зіставлення результатів за основним параметром — за паливною економічністю, тобто зіставлялись індикаторні ККД цих варіантів.

У реальних двигунів індикаторний ККД складає $\eta_i = 50\%$, а моделювання показало $(\eta_i)_m = 47\%$. Висока наближеність результатів розрахунків до економічних параметрів реальних двигунів дає право стверджувати, що принципово математична модель побудована на правильному розумінні процесів, а сама структура моделі вірна. Після доопрацювання моделі можна довести зближення результатів до більшої точності.

Крім цього, при моделюванні відкрились додаткові можливості для знаходження значень деяких коефіцієнтів, які вводились при інших методах розрахунків. Частина цих коефіцієнтів були уточнені, а деякі взагалі не використовуються.

Далі деякі пояснення.

По-перше, під час розрахунків індикаторного циклу не використовуються такі поняття, як ступінь стиснення, ступінь підвищення тиску на ділянці «с–у», поняття політропи, коефіцієнти виділення та використання теплової енергії та інші, які вносять помилки. Як буде показано далі, деякі коефіцієнти не використовуються, а навпаки — самі розраховуються під час моделювання.

Особливо слід розглянути пояснення щодо розташування індикаторної діаграми відносно верхньої мертвої точки. Деякі фахівці вважають, що ділянка індикаторної діаграми, де проходить найбільше тепловиділення, повинна розташовуватись частково до лінії ВМТ, а частково за цією лінією. Таке пояснення, на перший погляд, є вірним, тому що не зміщує процес розширення в бік раннього випуску газів, що повинно призвести до падіння індикаторного ККД. Співвідношення є правильним, але тільки в разі відсутності теплообміну. Це припущення робиться за відомих спрощеннях розрахунків індикаторних циклів.

У запропонованій моделі теплообмін між поверхнею циліндра та газом має місце, а тому тепла енергія, яка виділяється при згорянні палива на лінії стиснення, переходить до охолоджуючої рідини і буде втрачена назавжди.

Стосовно згоряння палива на лінії розширення, теплота теж переходить в систему охолодження, але в меншій кількості, тому виділення теплоти співпадає з втратами її на здійснення роботи. Це пояснення повністю підтверджується результатами моделювання (див. табл. 2.1...2.4).

Після коротких пояснень основ розрахунків за допомогою процесу моделювання покажемо, як можна провести не просто розрахунки, а науково-дослідну роботу, яка дає підготовку студенту до самостійної наукової діяльності.

2.2 Проведення науково-дослідних робіт із визначення оптимальних параметрів робочого тіла, а також оптимальних показників за умовами експлуатації

Основна ціль дослідження — визначення умов, при яких гарантується найбільше значення індикаторного ККД.

Для придання дослідженню більшої реальності проведемо науково-дослідну роботу, взяв за базу двигун MAN B&W S50ME-C.

Роботу слід вести наступним чином.

1. Заповнити вікно вхідних даних (рис. 1.7).
2. Вирішити, які вихідні дані будуть потрібні. Можна вивести досить велику кількість інформації. Однак, для цієї задачі достатньо трьох параметрів (тиск газів, температура газів та індикаторний ККД для варіанту розрахунків).
3. Запустити процес моделювання за кожним варіантом.
4. Роздрукувати результати.
5. На базі отриманих результатів заповнити табл. 2.1...2.4.

Табл. 2.1. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху ($\varphi_{\text{вс}}^{\circ}$) за різних кутів згоряння палива (φ_z°) при сталому значенні показника якості згоряння палива $m = 1$

$\varphi_{\text{вс}}^{\circ} \backslash \varphi_z^{\circ}$	20	30	40	50	60	70	80
-30	0,3358	0,3204	0,3040	0,2871	0,2706	0,2550	0,2405
-20	0,3899	0,3743	0,3585	0,3406	0,3232	0,3065	0,2898
-10	0,4380	0,4258	0,4114	0,3953	0,3770	0,3591	0,3416
0	0,4673	0,4628	0,4540	0,4411	0,4274	0,4105	0,3929
10	0,4642	0,4700	0,4717	0,4688	0,4604	0,4500	0,4350
20	0,4276	0,4439	0,4563	0,4644	0,4673	0,4637	0,4584
30	0,3755	0,3914	0,4120	0,4284	0,4424	0,4510	0,4534

Табл. 2.2. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху ($\varphi_{\text{вс}}^{\circ}$) за різних значень показника якості згоряння палива (m) при сталому значенні кута згоряння палива ($\varphi_z^{\circ} = 50^{\circ}$)

$\varphi_{\text{вс}}^{\circ} \backslash m$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
-30	0,3107	0,2871	0,2679	0,2530	0,2408	0,2303
-20	0,3655	0,3406	0,3208	0,3044	0,2907	0,2799
-10	0,4190	0,3953	0,3751	0,3585	0,3444	0,3334
0	0,4590	0,4411	0,4253	0,4109	0,3976	0,3858
10	0,4734	0,4688	0,4610	0,4508	0,4420	0,4341
20	0,4549	0,4644	0,4689	0,4696	0,4678	0,4643
30	0,4088	0,4284	0,4439	0,4528	0,4597	0,4639

Табл. 2.3. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху ($\varphi_{\text{вс}}^{\circ}$) за різних значень ступеня стиснення (ε) при сталих значеннях показника якості згоряння палива ($m = 1$) та кута згоряння палива ($\varphi_z^{\circ} = 50^{\circ}$)

$\varphi_{\text{вс}}^{\circ} \backslash \varepsilon$	12	14	16	18	20
-30	0,3020	0,3090	0,3145	0,3188	0,3222
-20	0,3538	0,3634	0,3710	0,3770	0,3820
-10	0,4029	0,4102	0,4265	0,4348	0,4419
0	0,4393	0,4550	0,4683	0,4793	0,4887
10	0,4502	0,4690	0,4839	0,4947	0,5058
20	0,4350	0,4510	0,4640	0,4748	0,4840
30	0,3940	0,4065	0,4158	0,4236	0,4299

Табл. 2.4. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху ($\varphi_{\text{вс}}^{\circ}$) для різних значень коефіцієнта надлишку повітря (α) при сталих значеннях показника якості згоряння палива ($m = 1$) та кута згоряння палива ($\varphi_z^{\circ} = 50^{\circ}$)

$\varphi_{\text{вс}}^{\circ} \backslash \alpha$	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
-30	0,3013	0,3068	0,3103	0,3134	0,3158
-20	0,3553	0,3620	0,3666	0,3696	0,3724
-10	0,4085	0,4143	0,4199	0,4249	0,4279
0	0,4495	0,4560	0,4618	0,4664	0,4701
10	0,4630	0,4702	0,4763	0,4810	0,4860
20	0,4426	0,4496	0,4561	0,4612	0,4659
30	0,3948	0,4006	0,4069	0,4133	0,4180

В вищенаведених таблицях виділені області, за межі яких не рекомендовано виходити. Ці межі визначені під час моделювання процесу і гарантують найбільшу паливну економічність при експлуатації двигуна.

У попередні роки конструктивні (ступень стиснення ε , показник якості згоряння палива m) та експлуатаційні показники (коефіцієнт надлишку повітря при згорянні палива α , кут випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ}$, кут згоряння палива φ_z°) вибирались на підставі досвіду та інтуїції проєктантів. В даному методі розрахунку ці показники визначаються за результатами моделювання, що покращує якість проєктування.

Розглянемо, як слід дотримуватись рекомендацій для двигуна MAN B&W S50ME-C за результатами дослідження у режимі автоматичного моделювання.

Результати будуть такими: $\varphi_{\text{вс}} = (0...+10)^{\circ}$, $\varphi_z = (30...40)^{\circ}$, $\varepsilon = 16...20$, $\alpha = 2,4...2,6$, $m = 1,0...1,5$. Ці дані слід розглядати як первинні, що видає комп'ютер. Після аналізу їх взаємного впливу слід провести повторно моделювання з урахуванням зробленої корекції. Результати моделювання (табл. 2.1...2.4) представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2.1...2.16.

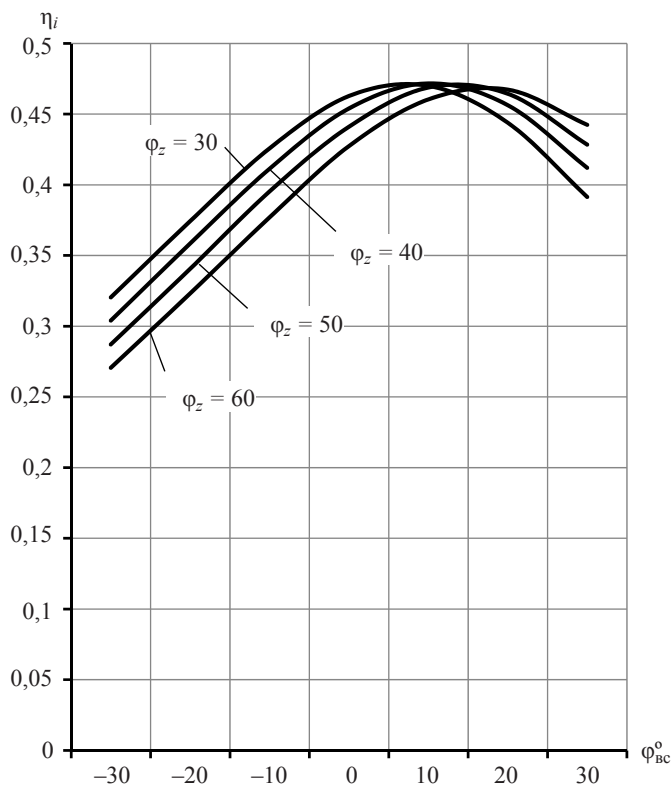


Рис. 2.1. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху $\phi_{вс}^o$ за різних кутів згоряння палива ϕ_z^o та сталому значенні показника якості згоряння палива $m = 1$

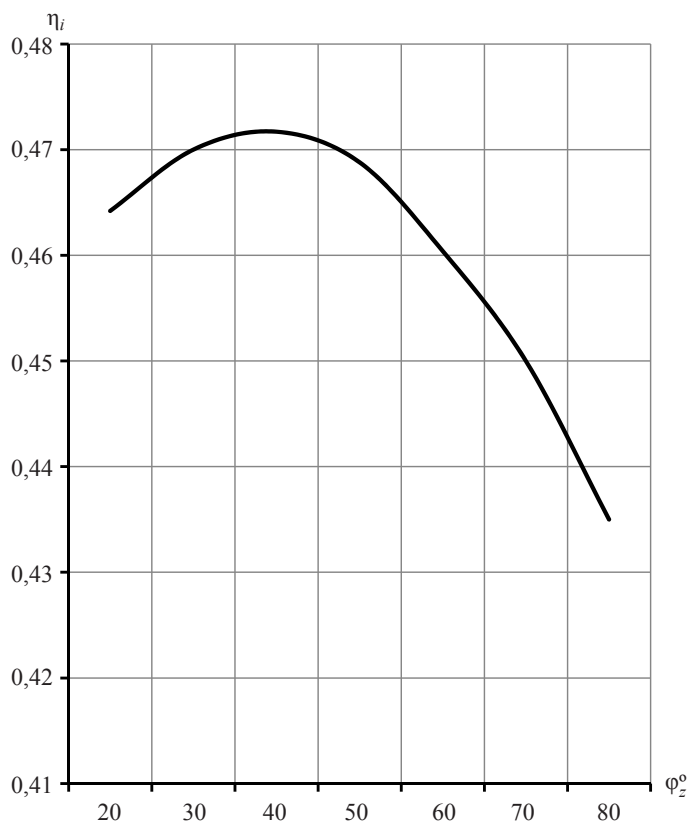


Рис. 2.2. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута згоряння палива φ_z^o для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{вс}^o = 10$ та показника якості згоряння палива $m = 1$



Рис. 2.3. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута згоряння палива φ_z^o для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{вс}^o = 20$ та показника якості згоряння палива $m = 1$

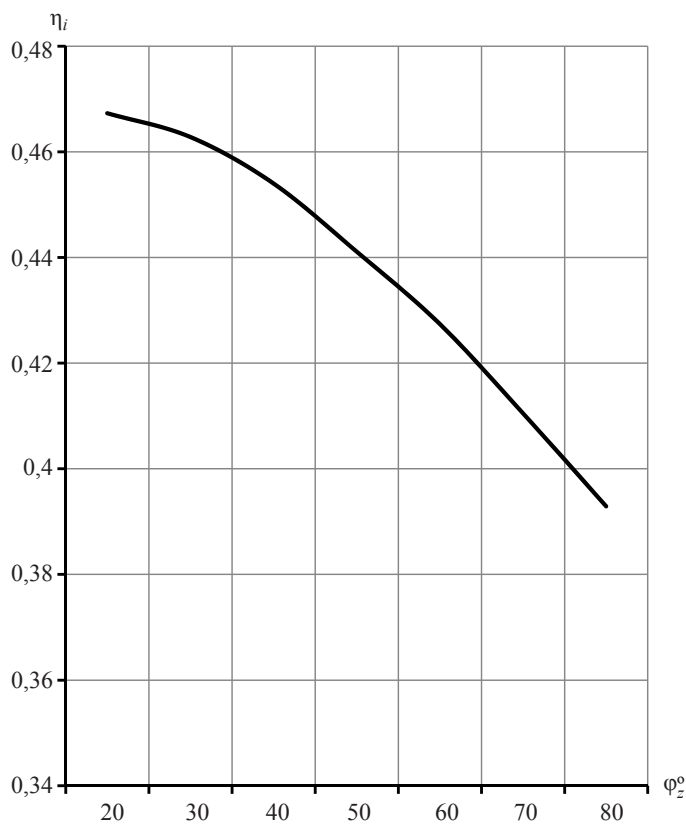


Рис. 2.4. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута згоряння палива φ_z^o для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{вс}^o = 0$ та показника якості згоряння палива $m = 1$

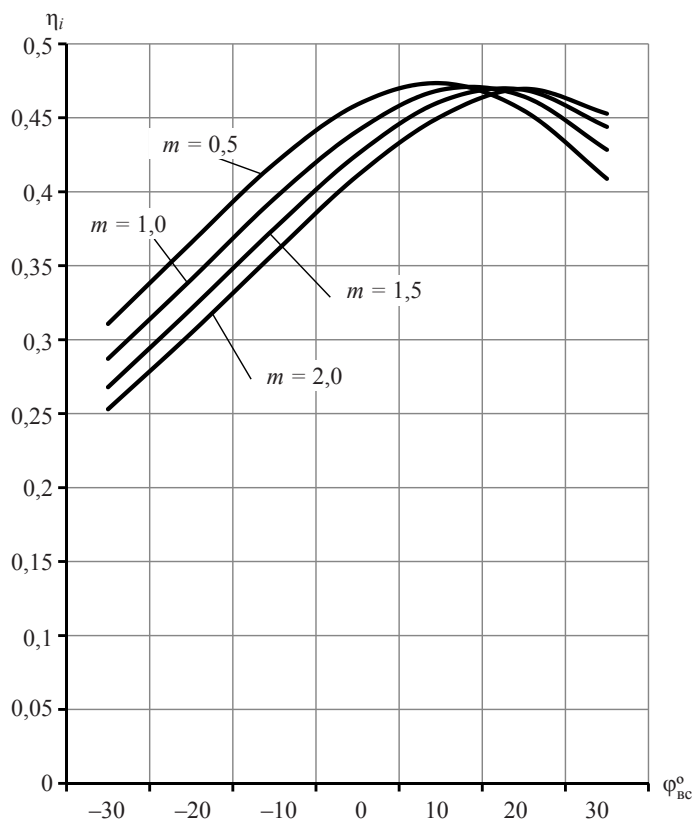


Рис. 2.5. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху $\phi_{вс}^o$ за різних значень показника якості згоряння палива m та сталому куту згоряння палива $\phi_z^o = 50$

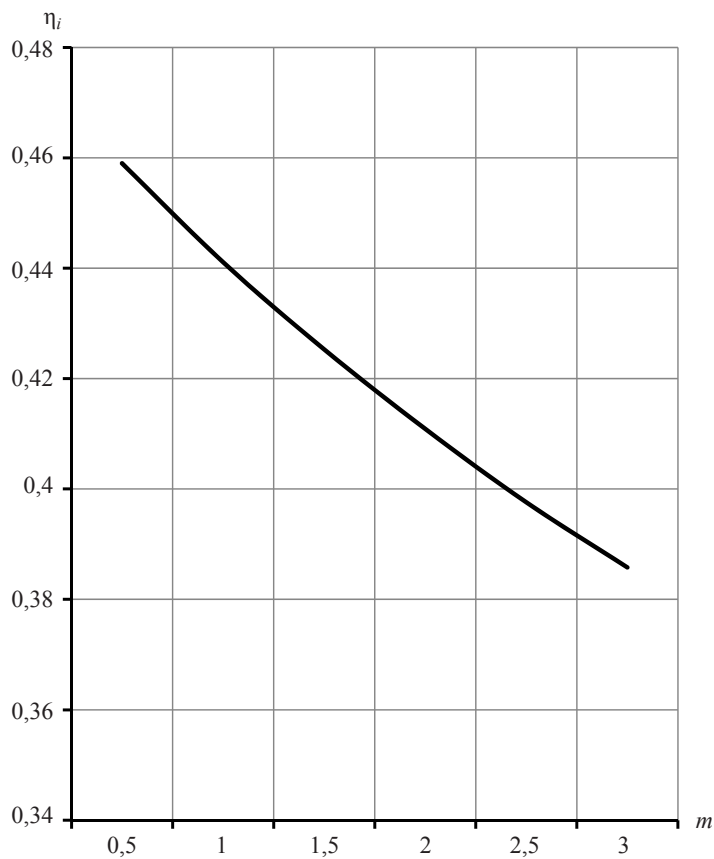


Рис. 2.6. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення показника якості згоряння палива m для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^0 = 0$ і кута згоряння палива $\varphi_z^0 = 50$

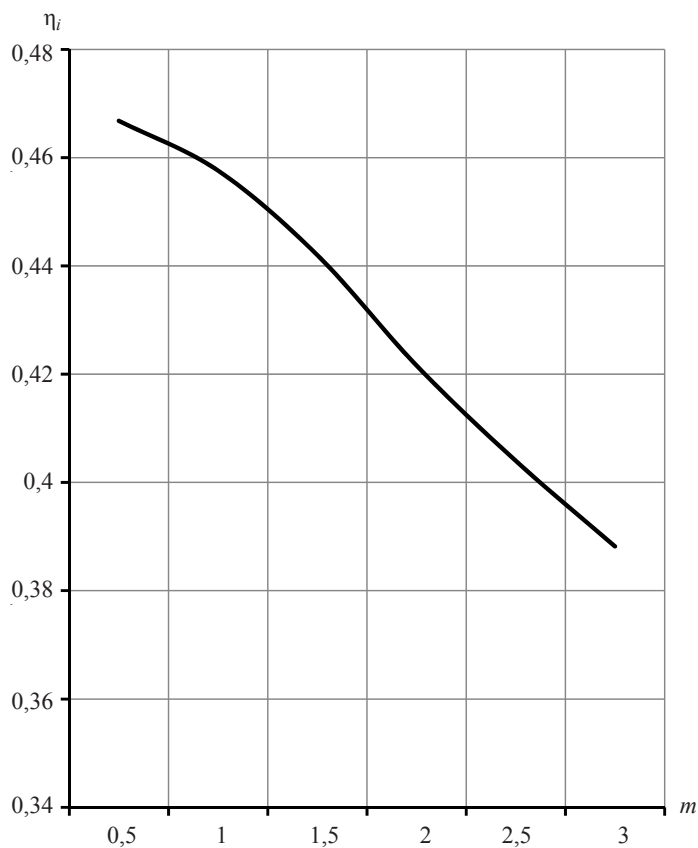


Рис. 2.7. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення показника якості згоряння палива m для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = 10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

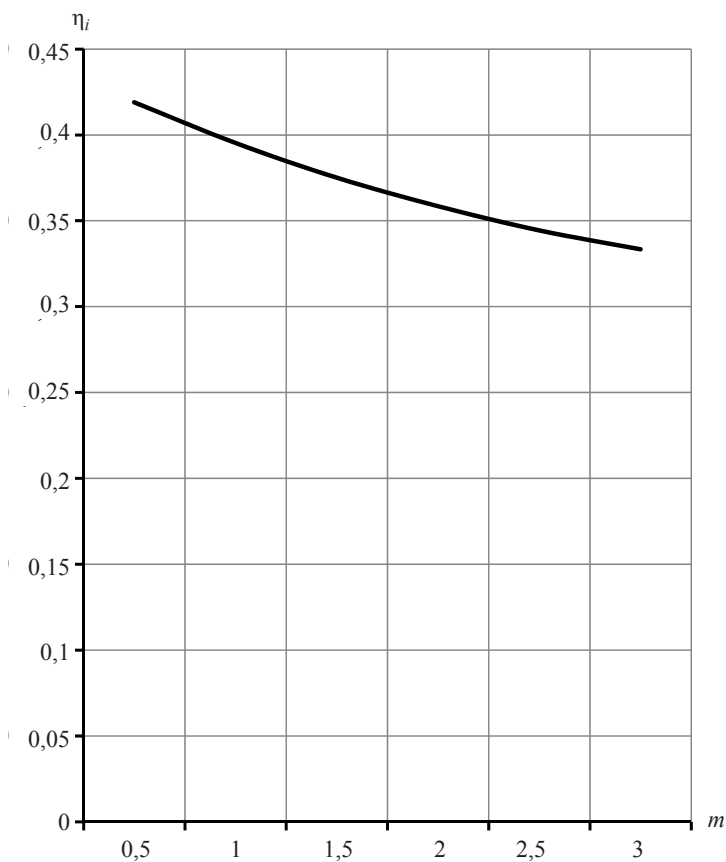


Рис. 2.8. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення показника якості згоряння палива m для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = -10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

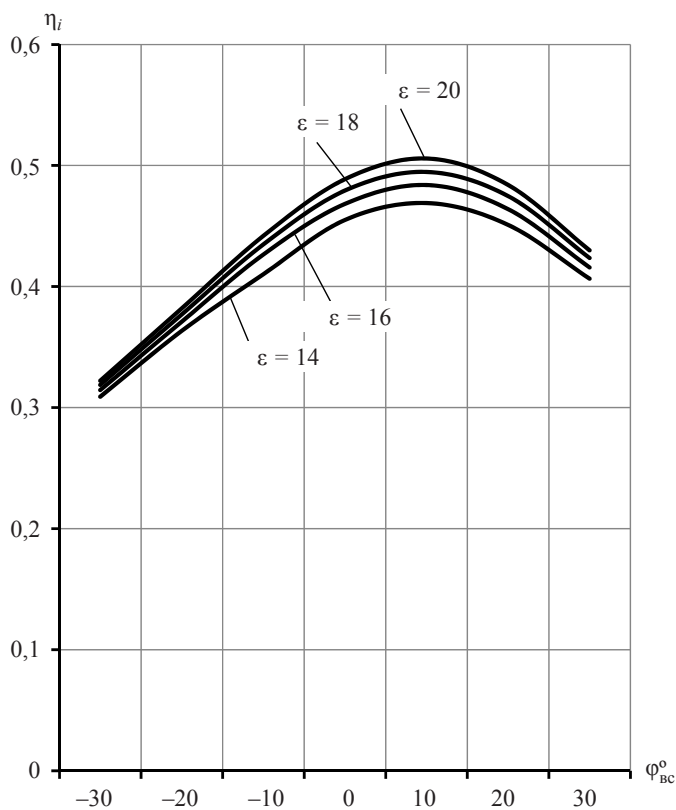


Рис. 2.9. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху $\phi_{вс}^o$ при різних значеннях ступеня стиснення ϵ та сталому куті згоряння палива $\phi_z^o = 50$

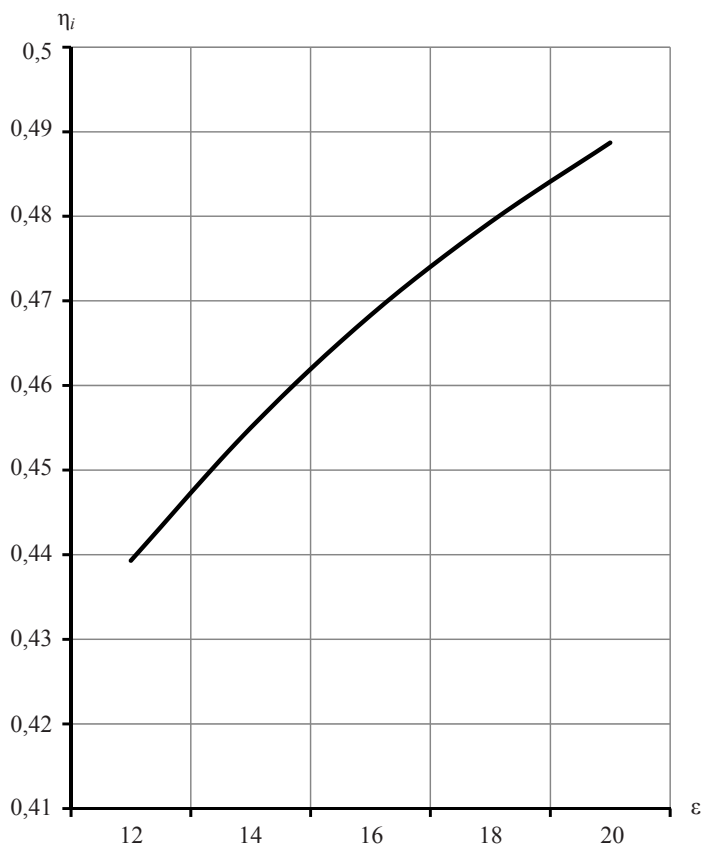


Рис. 2.10. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення ступеня стиснення ϵ для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = 0$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

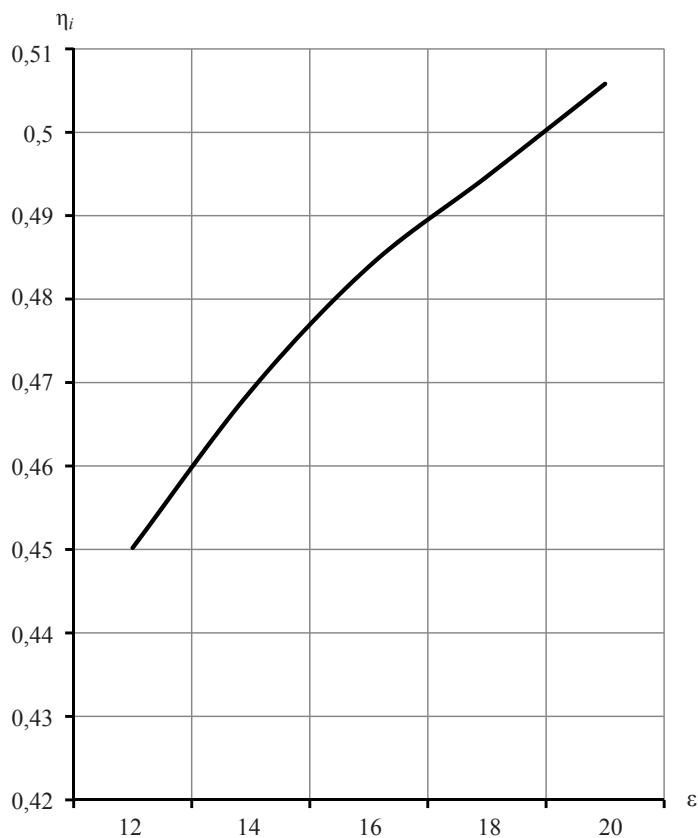


Рис. 2.11. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення ступеня стиснення ϵ для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = 10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

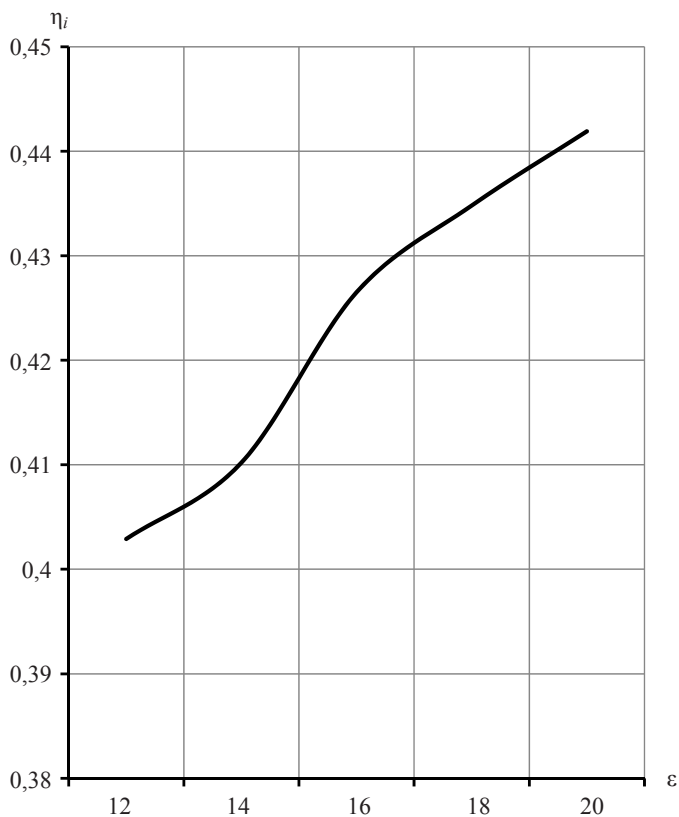


Рис. 2.12. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення ступеня стиснення ϵ для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = -10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

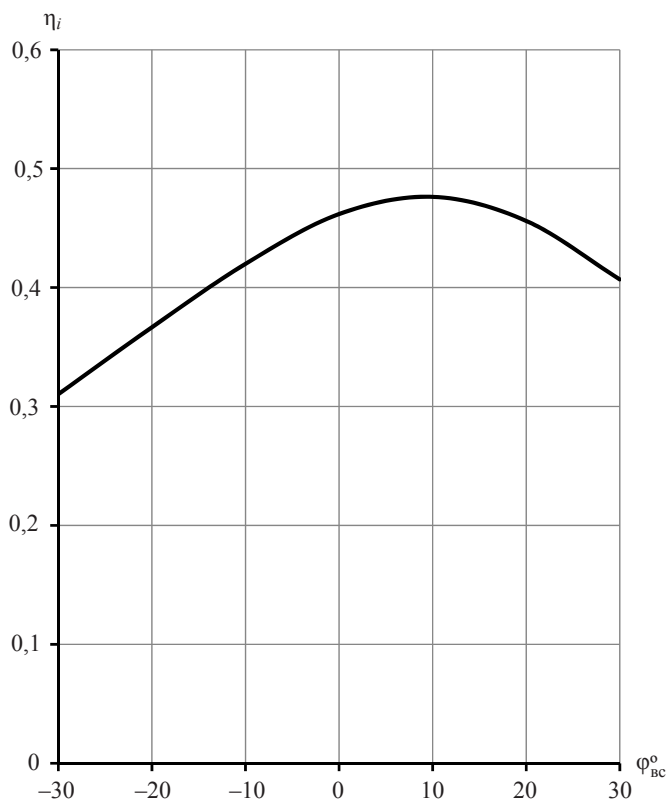


Рис. 2.13. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від кута випередження спалаху $\phi_{вс}^{\circ}$ при сталому значенні коефіцієнта надлишку повітря α та куті згоряння палива $\phi_z^{\circ} = 50$

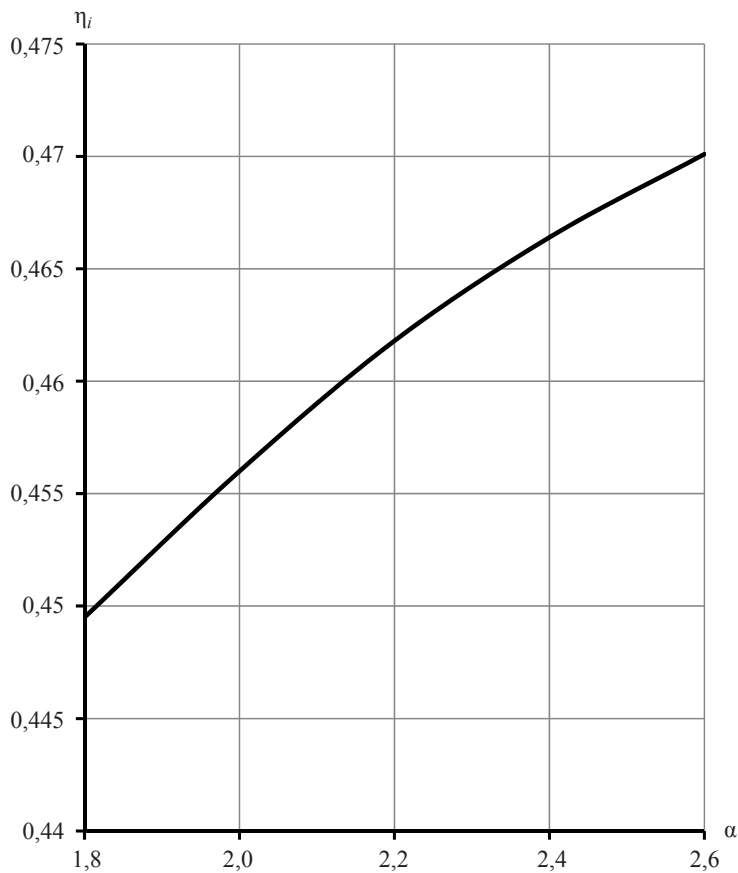


Рис. 2.14. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення коефіцієнта надлишку повітря α для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = 0$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

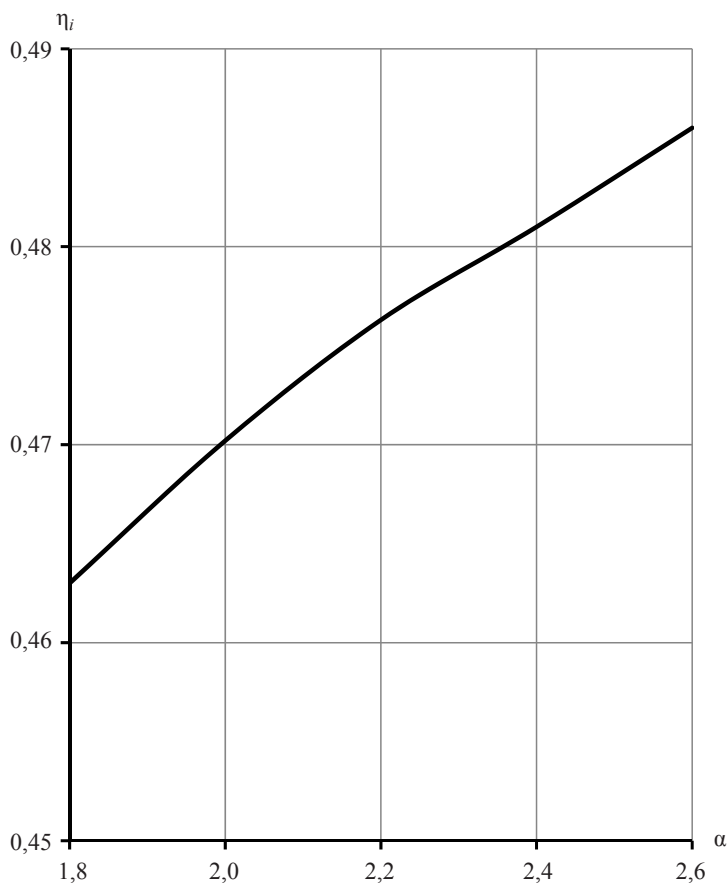


Рис. 2.15. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення коефіцієнта надлишку повітря α для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = 10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

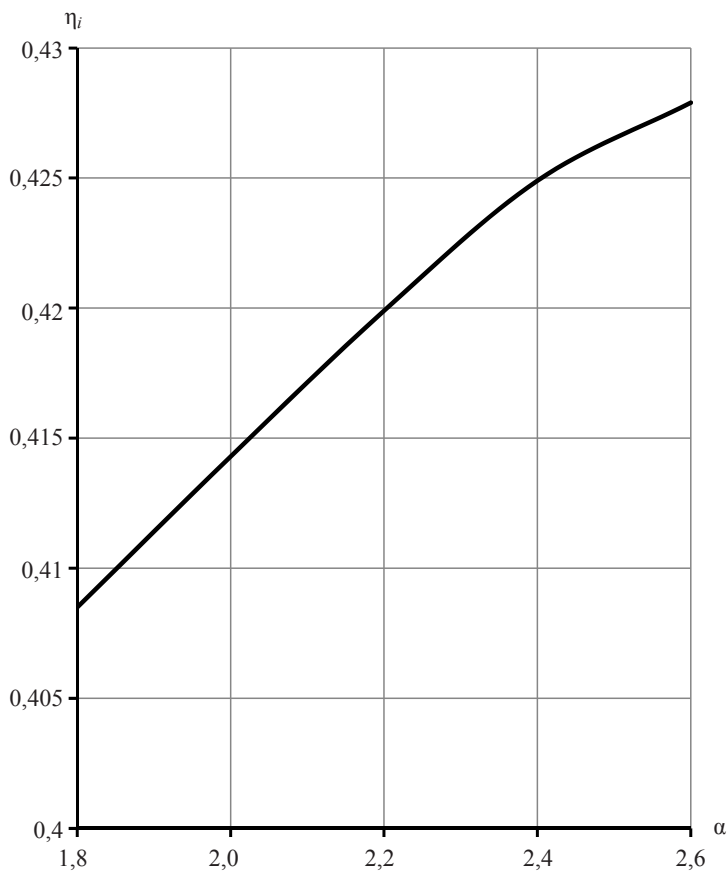


Рис. 2.16. Залежність індикаторного ККД циклу двигуна від значення коефіцієнта надлишку повітря α для сталих значень кута випередження спалаху $\varphi_{\text{вс}}^{\circ} = -10$ і кута згоряння палива $\varphi_z^{\circ} = 50$

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Які основні відмінності в розрахунках робочого процесу за схемою Гріневецького–Мазінга та при використанні математичної моделі «Індикаторний цикл»?
2. Що покладено в основу створення математичної моделі «Індикаторний цикл»?
3. Як впливає форма камери стиснення на індикаторний ККД циклу?
4. Чим відрізняється кут випередження подачі палива від кута випередження спалаху палива?
5. Які основні висновки можна зробити за результатами дослідження впливу кута випередження спалаху, отриманими за допомогою математичної моделі «Індикаторний цикл»?
6. Назвіть основні параметри робочого тіла та показники процесів, які можна отримати, використовуючи модель «Індикаторний цикл».
7. Як зміниться індикаторний ККД циклу при зменшенні або збільшенні кута випередження спалаху палива?
8. Як виконується розрахунок індикаторної роботи за розгорнутою індикаторною діаграмою?
9. Поясніть вплив ступеня стиснення ϵ на індикаторний ККД циклу.
10. Яким за характером проходження слід рахувати стиснення?

3 РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ МЕХАНІЧНО ВІЛЬНОГО КЛАПАНА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ГАЗООБМІНОМ ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА

Це питання виникає у зв'язку з переходом на нові схеми керування роботою випускного клапана при прямоточно-клапанній системі газообміну.

3.1 Шляхи розвитку систем газообміну

Система газообміну виконує важну функцію в роботі двигуна і потребує поетапного удосконалення. За періодом існування двигунів системи газообміну можна поділити на:

- механічні;
- гідромеханічні;
- гідропневматичні;
- гідроелектронні.

Фахівці знайомі з принципами роботи кожної з систем.

Перша (механічна) схема характеризується простотою та надійністю роботи. Остання має гарні показники та складається із деяких підсистем, що зменшує надійність роботи.

На часі, по нашому розумінню, є гідрозолотникова система, яка вбирає позитивні якості першої і останньої з числа розглянутих. Ця система має один суттєвий недолік — немає однозначного зв'язку клапана із сигнальним елементом регулятора, що може призвести до збою в роботі системи регулювання. Цю проблему можна усунути за допомогою запропонованої нижче схеми керування роботою випускного клапана.

На рис. 3.1 та 3.2 наведені принципові схеми золотника та системи керування випускним клапаном.

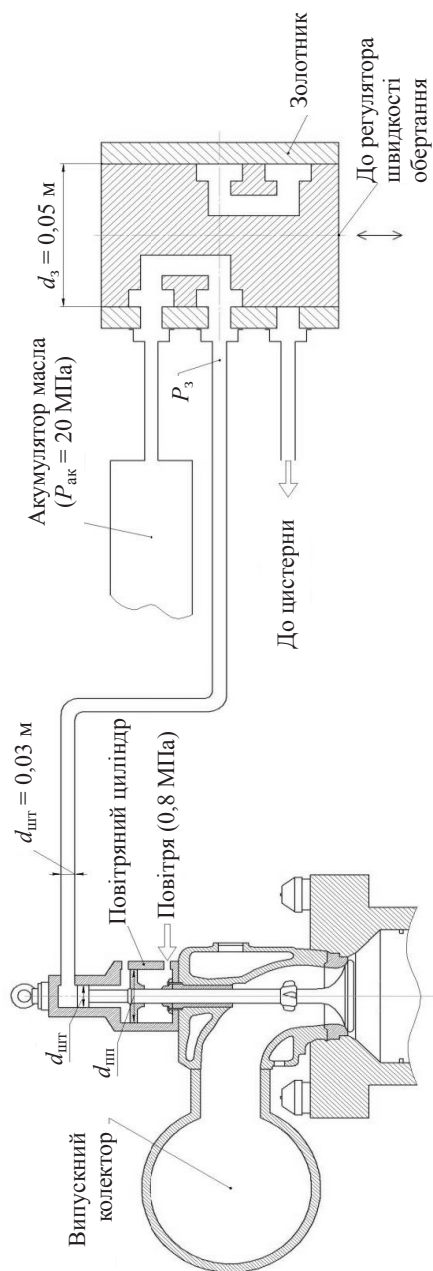


Рис. 3.1. Схема золотникового гідропневматичного керування випускним клапаном головного суднового малооборотового двигуна MAN B&W S50ME-C

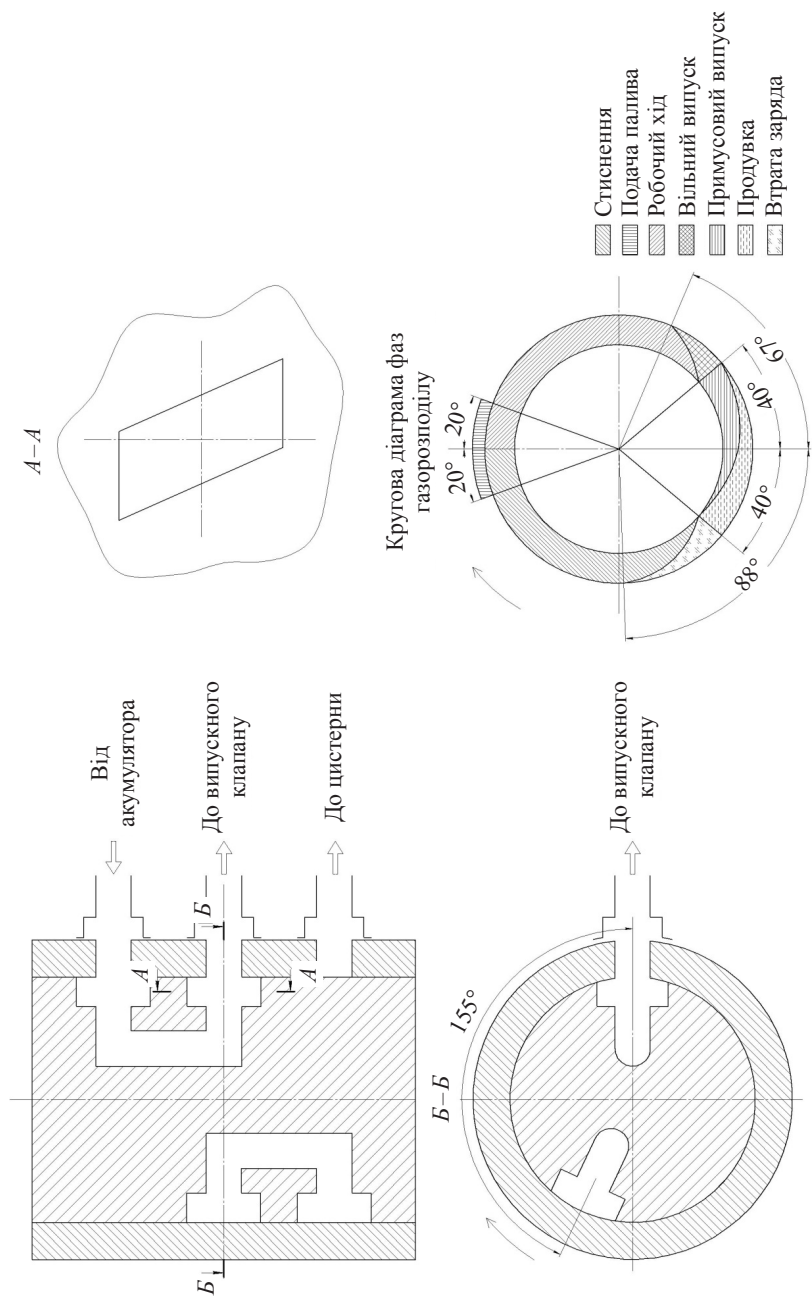


Рис. 3.2. Конструктивна схема золотника та кругова діаграма газорозподілу

3.2 Складання розрахункової схеми руху вільного клапана, що буде покладена в основу створення математичної моделі

Наведемо схему розрахунку закону руху такого клапана, на базі якого розробляється алгоритм програми для чисельного розв'язання проблеми за допомогою ЕОМ.

Кінцеве рішення буде отримано шляхом розрахунку окремих складових, які об'єднані в один послідовний ланцюг.

Можливість вирішення поставленого питання полягає у створенні гідродинамічної моделі клапана, яка дає можливість отримати закон руху клапана, без якого дослідження процесу газообміну є неможливим. В якості прикладу розраховано рух випускного клапана двигуна S50ME-C.

Стан клапана у процесі руху можна записати у такому вигляді:

$$dP_{\gamma} + dP_{\text{трт}} + dP_{\text{пов}} - dP_{\text{тиж}} - dP_3 = 0, \quad (36)$$

де P_{γ} — тиск мастила у маслопроводі, викликаний силами інерції від мас клапана і масла в маслопроводі, МПа;

$P_{\text{трт}}$ — тиск масла, викликаний тертям масла зі стінками циліндра, МПа;

$P_{\text{пов}}$ — тиск повітря у пневмоциліндрі випускного клапана, МПа;

$P_{\text{тиж}}$ — тиск у маслопроводі, викликаний силами тяжіння від загальної маси випускного клапана, МПа;

P_3 — тиск масла на вході у маслопровід (після золотника), МПа.

Перепишемо це рівняння у вигляді, що дає можливість розв'язати його численним методом на ЕОМ:

$$\Delta P_{\gamma} + \Delta P_{\text{трт}} + P_{\text{пов}} - P_{\text{тиж}} - \Delta P_3 = 0. \quad (37)$$

Розглянемо для прикладу одну фазу процесу газообміну — вільний випуск газів. Загальний рух клапана на цій фазі слід поділяти на ряд елементарних ділянок, тривалість кожної з яких визначається кутом повороту кривошину на кут $\Delta\phi$. Визначаючи час дії цієї фази, слід прийняти $\Delta\phi \leq 1$, що подальше приймається за крок проведення розрахунку.

Таким чином, час дії кожної елементарної ділянки:

$$\Delta\tau = \frac{1}{6n}, \text{ с}, \quad (38)$$

де n — частота обертання колінчастого валу, хв^{-1} .

Площа активної поверхні прохідного отвору у золотнику (золотник – корпус) для кожної ділянки (окрім першої):

$$\Delta F_3 = \frac{\pi \cdot d_3}{360} \cdot \Delta\phi \cdot b, \text{ м}^2 \quad (39)$$

де d_3 — зовнішній діаметр золотника, м;

b — ширина масляних каналів у золотнику та його корпусі, м.

Витрата масла через вихідний отвір золотника:

$$\Delta W_3 = \mu_3 \cdot V_{31} \cdot \Delta F_3, \quad (40)$$

де μ_3 — коефіцієнт витрати масла через вихідний отвір золотника;

V_{31} — швидкість виходу масла через отвір золотника, м/с.

Величина V_3 є невідомою, тому у першому наближенні може бути прийнята в межах 50...100 м/с.

Швидкість випускного клапана на розрахунковій ділянці:

$$\Delta V_{\text{кл}} = \frac{\Delta W_3}{0,785 d_{\text{пк}}^2}, \quad (41)$$

де $d_{\text{пк}}$ — діаметр плунжера масляного циліндра, м.

Прискорення випускного клапана на розрахунковій ділянці:

$$\gamma_{\text{кл}} = \frac{\Delta V_{\text{кл}}}{\Delta \tau}, \text{ м/с.} \quad (42)$$

Маса масла у маслопроводі

$$M_{\text{м}} = 0,785 \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{м}}, \text{ кг} \quad (43)$$

де $d_{\text{тр}}$ — діаметр маслопроводу, м;

$l_{\text{тр}}$ — довжина маслопроводу, м;

$\rho_{\text{м}}$ — густина масла, кг/м³.

Сила інерції від маси клапана та масла у маслопроводі

$$P_{\text{укл}} = \frac{(M_{\text{кл}} + M_{\text{м}}) \cdot \gamma_{\text{кл}} \cdot 10^{-6}}{0,785 d_{\text{пк}}^2}, \text{ МПа.} \quad (44)$$

Число Рейнольдса для масла у маслопроводі

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{кл}} \cdot l_{\text{тр}}}{v_{\text{км}}}, \quad (45)$$

де $v_{\text{км}}$ — кінематична в'язкість масла м²/с.

Коефіцієнт тертя потоку у маслопроводі:

при $\text{Re} < 2300$

$$\lambda_{\text{тр}} = \text{Re} / 64; \quad (46)$$

при $\text{Re} > 2300$

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,316 / \text{Re}^{0,25}. \quad (47)$$

Тиск масла перед плунжером гідроциліндра клапана:

$$P_{\text{тр}} = \left(\frac{\lambda_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot V_{\text{кл}}^2 \cdot \rho_{\text{м}}}{2d_{\text{тр}}} \right) \cdot 10^{-6}, \text{ МПа.} \quad (48)$$

Тиск масла у маслопроводі, викликаний тиском повітря у пневматичному циліндрі випускного клапана

$$P_{\text{пов}} = P_{\text{п}} \cdot (d_{\text{пп}}^2 - d_{\text{шк}}^2) / d_{\text{пкл}}^2, \quad (49)$$

де $P_{\text{п}}$ — тиск повітря у пневматичному циліндрі, МПа;

$d_{\text{шк}}$ — діаметр штока клапана, м.

Тиск у маслопроводі, який викликаний вагою випускного клапана

$$P_{\text{тжн}} = \frac{g \cdot M_{\text{кл}}}{0,785d_{\text{тр}}^2}, \text{ МПа,} \quad (50)$$

де g — прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Загальний тиск, який діє на клапан у процесі роботи (тиск у маслопроводі)

$$P_{\text{мп}} = P_{\text{укл}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{пов}} - P_{\text{тжн}}, \text{ МПа.} \quad (51)$$

Швидкість з якою виходить масло із золотника:

$$V_{32} = \xi_{\text{м}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{ак}} - P_{\text{мп}}) \cdot 10^{-6}}{\rho_{\text{м}}}}, \text{ м/с,} \quad (52)$$

де $\xi_{\text{м}}$ — коефіцієнт втрати тиску при проході через випускний отвір золотника;

$P_{\text{ак}}$ — тиск масла в акумуляторі, МПа.

Після отримання розрахункової швидкості виходу масла у маслопровод V_{31} треба зіставити з початковою прийнятою у формулі (40).

Якщо різниця двох значень перевищує 5 %, то останнє значення V_{31} слід внести у формулу (40) і повторити розрахунок.

Після досягнення потрібної точності ітерацію слід припинити і перейти до наступної розрахункової ділянки.

При цьому слід стежити за загальним рухом клапана. Після того, як сумарний хід досягне прийнятої конструктивної величини ходу клапана, розрахунок завершиться.

Виходячи з вищенаведених розрахунків, створена програма в середовищі Visual Basic for Applications, яка в автоматичному режимі проводить всі розрахунки і будує графік залежності ходу клапана від кута повороту кривошипу.

3.3 Складання комп'ютерної програми руху випускного клапану

Структура програми для моделювання роботи випускного клапану:

```

DF = CDb1(TextBox1.Text)
n = CDb1(TextBox2.Text)
B = CDb1(TextBox3.Text)
D3 = CDb1(TextBox4.Text)
V31 = CDb1(TextBox5.Text)
DTP = CDb1(TextBox6.Text)
KHB = CDb1(TextBox7.Text)
МКЛ = CDb1(TextBox8.Text)
LTP = CDb1(TextBox9.Text)
ROM = CDb1(TextBox10.Text)
ДПП = CDb1(TextBox11.Text)
ДШКЛ = CDb1(TextBox12.Text)
PAK = CDb1(TextBox13.Text)
ПП = CDb1(TextBox14.Text)
MY = CDb1(TextBox17.Text)
KSI = CDb1(TextBox30.Text)
HKЛ = CDb1(TextBox32.Text)
VKL0 = 0

```

```

Application.GoTo (ActiveWorkbook.Sheets("Лист1").Range("A1:E100"))
Selection.ClearContents
Selection.Cells(1).Select

```

```

For DF = DF To 10000
T = DF / 6 / n
F3 = 0.00436 * D3 * DF * B
10 W3 = V31 * F3
FTP = 0.785 * DTP ^ 2
VKL1 = VKL0 + W3 / 0.785 / ДШКЛ ^ 2
VKLC = (VKL0 + VKL1) / 2
VKL = W3 / (0.785 * DTP ^ 2)
PE = VKLC * DTP / KHB
If PE <= 2300 Then
LBD = 64 / PE
End If
If PE >= 2300 Then
LBD = 0.316 / (PE ^ 0.25)
End If
PT = ((0.5 * LBD * LTP * VKLC ^ 2 * ROM) * 10 ^ (-6) / DTP)
MM = 0.785 * DTP ^ 2 * LTP * ROM
JKЛ = (VKL1 + VKL0) / T
PJКЛ = ((МКЛ + MM) * JKЛ / (0.785 * ДШКЛ ^ 2)) * 10 ^ (-6)

```

```

РПОВ = РП * (ДПП ^ 2 - ДШКЛ ^ 2) / ДШКЛ ^ 2
PTG = 9.80665 * МКЛ * 10 ^ (-6) / (0.785 * ДШКЛ ^ 2)
PTP = PT + РЖКЛ + РПОВ - PTG
V32 = KSI * (2 * (ПАК - PTP) * 10 ^ 6 / ROM) ^ 0.5
If Abs((V31 - V32) / V31) >= 0.000001 Then
V31 = V32
GoTo 10
End If
ДН = VKLC * T

Sheets("Лист1").Cells(Abs(DF - 1 ^ DF + 1 ^ DF) + 2, 1) = DF
Sheets("Лист1").Cells(Abs(DF - 1 ^ DF + 1 ^ DF) + 2, 2) = DH
Sheets("Лист1").Cells(Abs(DF - 1 ^ DF + 1 ^ DF) + 2, 4) = РЖКЛ
Sheets("Лист1").Cells(Abs(DF - 1 ^ DF + 1 ^ DF) + 2, 5) = VKLC

```

```

Application.GoTo ActiveWorkbook.Sheets("Лист1").Cells(3, 2)
stolbik = ActiveCell.Column
suma = 0
For stroka = 3 To 10000
suma = suma + ActiveSheet.Cells(stroka, stolbik)
Sheets("Лист1").Cells(Abs(DF - 1 ^ DF + 1 ^ DF) + 2, 3) = suma
Next stroka
If suma >= НКЛ Then
GoTo 100
End If
Next

```

```

100 UserForm1.TextBox15.Text = Format(T, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox16.Text = Format(F3, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox18.Text = Format(W3, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox19.Text = Format(FTP, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox20.Text = Format(VKL, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox21.Text = Format(PE, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox22.Text = Format(LBD, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox23.Text = Format(PT, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox24.Text = Format(MM, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox25.Text = Format(ЖКЛ, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox26.Text = Format(РЖКЛ, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox27.Text = Format(РПОВ, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox28.Text = Format(PTG, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox29.Text = Format(PTP, "#,##0.0000000000")
UserForm1.TextBox31.Text = Format(V32, "#,##0.0000000000")

```


3.4 Результати розрахункового дослідження за допомогою моделі руху механічно вільного клапана

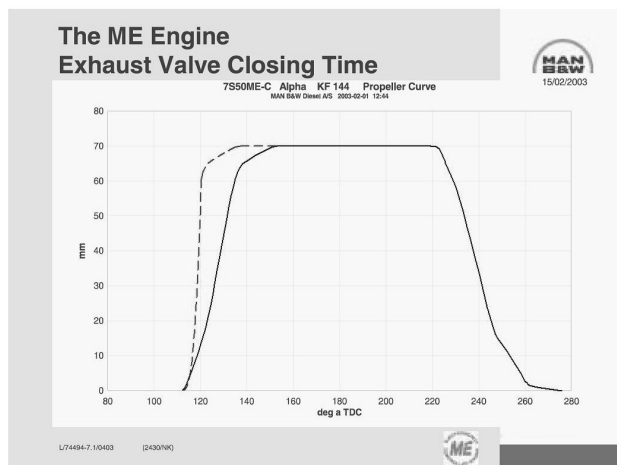
На рис. 3.3, 3.4 наведені результати комп'ютерного моделювання роботи випускного клапана при гідропневматичній роботі системи та золотниковим керуванням фаз газорозподілу деякі фрагменти цієї програми.

Розрахунок ходу механічно вільного клапана

Крок розрахунку, град	DФ = 1	Час руху клапана на ділянці, с	T = 0,01181102362
Частота обертів золотника, хв-1	n = 127	Площа золотника, м ²	F3 = 0,00005886000
Ширина вихідної канавки золотника, м	B = 0,03	Витрата нафта через золотник, м ³ /с	W3 = 0,01059982222
Діаметр золотника, м	D3 = 0,05	Площа поперечного перерізу труби, м ²	FTR = 0,00070650000
Швидкість витікання нафта із золотника (перше наближення), м/с	V31 = 100	Швидкість клапана, м/с	VKL = 15,00328693488
Діаметр нафтяного трубопроводу, м	DTP = 0,03	Число Рейнольдса	RE = 1 875,41086685965
Кінематична в'язкість нафта, при температурі 50 С, м ² /с	KNB = 0,00003	Коеф. тертя нафти об стінки циліндра	LBD = 0,03412585537
Маса клапана, кг	MKL = 40	Тиск у трубі спричинений тертя нафта, МПа	PT = 0,00480105182
Довжина труби, м	LTR = 3	Маса нафта, кг	MM = 1,69560000000
Густина нафта, кг/м ³	POM = 800	Прискорення клапана, м/с ²	JKL = 317,56957345490
Діаметр повітряного поршня, м	DNП = 0,13	Тиск у трубі, що викликана силою інерції від поступальних мас клапана та маси нафта, МПа	RJKL = 4,68551093664
Діаметр штока клапана, м	DШК = 0,06	Тиск нафта, що викликаний тиском повітря в системі закриття клапана, МПа	RPOB = 4,43333333333
Тиск нафта в акумуляторі, МПа	PAK = 25	Тиск нафта, що викликаний силою тяжіння, МПа	PTG = 0,13880608634
Тиск повітря для закриття клапана, МПа	PP = 1,2	Сумарний тиск нафта за золотником, МПа	PTR = 8,98483923545
Коефіцієнт витрати нафта	MY = 0,7	Швидкість витікання нафта із золотника в трубу, м/с	VZ2 = 180,08525910860
Коефіцієнт місцевого опору	KSI = 0,9		
Максимальний хід клапана, м	hкл = 0,07		

Розрахунок Друк

Рис. 3.3. Вікно для введення вхідних даних



———— за даними фірми

----- розрахункова

Рис. 3.4. Закон відкриття клапана двигуна MAN B&W S50ME-C

Як видно з рис. 3.4, закон відкриття випускного клапану, отриманий розрахунковим шляхом, та реальний закон достатньо схожі, що підтверджує правильність створення математичної моделі руху механічно вільного клапана.

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Які перспективні схеми управління роботою газорозподільчого клапана можна рекомендувати до використання у двотактних двигунах?
2. Як розуміти поняття «механічно вільний клапан»?
3. Які переваги має гідрозолотникове керування роботою газорозподільчих клапанів?
4. Які основні рухи робить золотник в системі керування роботою клапана?
5. З яким вузлом двигуна кінематично пов'язаний золотник в системі регулювання роботи двигуна?
6. Як треба керувати золотником для зміни циклової подачі та кута випередження спалаху палива?

4 ПОБУДОВА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ МІНІМІЗАЦІЇ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНІ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИЛІНДРА ДЛЯ СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Питання проблеми мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра з'явилося після появи суднових ДВЗ зі збільшеним ходом поршня.

Проведені раніше дослідження залежності величини індикаторного ККД від співвідношення S/D_c для різних типів двигунів за допомогою моделі «Індикаторний цикл» виконувались за умов, що камера стиснення (камера згоряння) має циліндричну форму. Таке обмеження робилося з метою спрощення розрахунків та полегшення розуміння процесу моделювання.

Циліндрична камера стиснення характерна, як правило, для двигунів з малими розмірами циліндра.

У двигунах великих розмірів, якими є головні малообертові суднові двигуни, камери стиснення частіше всього мають напівкульову, кульову та іншу форму, що приводить до збільшення або зменшення поверхні охолодження та обов'язково впливає на індикаторний ККД. Це приводить до виникнення додаткового впливу на питому поверхню охолодження циліндра.

На рис. 4.1 представлені схеми найбільш характерних форм камер згоряння двигунів внутрішнього згоряння. Форми камер згоряння визначаються типом двигуна, схемою газообміну та ін.

У зв'язку з тим, що розрахунки за цим питанням дуже прості, спеціальна модель не створюється. Дослідження проводяться з використанням першої моделі «Індикаторний цикл».

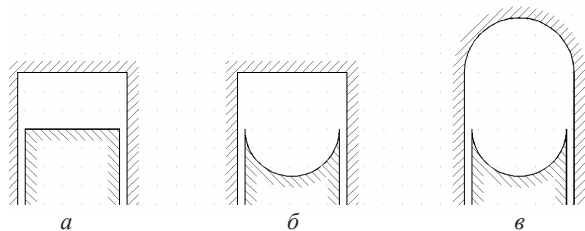


Рис. 4.1. Схеми форм камер згоряння:

а — циліндрична; *б* — напівкульова; *в* — кульова

Розрахункова схема (алгоритм) для створення математичної моделі проведення мінімізації питомої поверхні охолодження для різних форм камери стиснення наведена в табл. 4.1...4.3.

Як приклад розглянемо малообертовий головний судновий двигун G80ME-C9-ТП.

Необхідні дані для розрахунків:

$D_{ц} = 0,8$ м — діаметр циліндра;

$S = 3,72$ м — хід поршня;

$\epsilon_d = 14,5$ — дійсна ступінь стиску;

$\rho = 1,5$ — ступінь попереднього розширення;

$\psi_s = 0,08$ — частка втраченого ходу.

Основна мета процесу мінімізації — показати, який вплив має співвідношення ходу поршня до діаметру циліндра та вплив форми камери стиснення на кількість втраченої теплоти через стінки циліндра.

Для отримання достовірних результатів треба виконати умову — збереження постійним робочого об'єму циліндра для всіх варіантів, тобто $V_c = \text{const}$.

Позначимо розміри циліндра прийнятого двигуна як базові:

$$D_{ц} = D_{цб} = 0,8 \text{ м}, S = S_б = 3,72 \text{ м}.$$

Розміри циліндра у процесі мінімізації позначимо з індексом v_i : $D_{цv}$, S_v , де v_i — співвідношення між ходом поршня S_v та діаметром циліндра $D_{цv}$.

Якщо виконати умову $V_c = \text{const}$, то формула для визначення діаметра циліндра за різних значень v_i має вигляд:

$$D_{цv} = \sqrt[3]{\frac{D_{цб}^2 \cdot S_б}{v}}.$$

Після визначення $D_{цv}$ в табл. 4.1...4.3 наведено розрахункову схему проведення мінімізації для найбільш характерних форм камери стиснення, а на рис. 4.2 показана графічна залежність питомої поверхні охолодження циліндра від співвідношення $S_v/D_{цv}$ та різних форм камер стиснення для двигуна G80ME-C9-ТП.

Таблиця 4.1. Алгоритм проведення мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра з камерою згоряння за схемою «а» для двигуна G80ME-C9-ПІ

№	Найменування	Розрахункова формула	V									
			2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
1	Діаметр циліндра, м	$D_{\text{цв}} = \sqrt[3]{\frac{D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6}{V}}$	1,06	0,93	0,84	0,78	0,73	0,67	0,62	0,58	0,55	0,53
2	Об'єм камери стиснення, м ³	$V_c = \frac{0,785 \cdot D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6 (1 - \psi_s)}{\varepsilon_d - 1}$	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
3	Поверхня охолодження циліндра у т. «с»	$F_{\text{цс}} = \frac{4 \cdot V_c}{D_{\text{цв}}} + 1,57 \cdot D_{\text{цв}}^2$	2,24	1,90	1,72	1,61	1,54	1,46	1,43	1,41	1,40	1,40
4	Об'єм циліндра циліндра в т. «з»	$V_z = \rho \cdot V_c$	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
5	Повна поверхня охолодження в т. «з»	$F_{\text{zv}} = \frac{4 \cdot V_z}{D_{\text{цв}}} + 1,57 \cdot D_{\text{цв}}^2$	2,44	2,24	2,19	2,21	2,26	2,41	2,59	2,78	2,97	3,16
6	Середня величина поверхні охолодження на ділянці «у-з»	$F_{\text{срв}} = \frac{F_{\text{cv}} + F_{\text{zv}}}{2}$	2,34	2,07	1,95	1,91	1,90	1,94	2,01	2,09	2,19	2,28
7	Середній об'єм циліндра на ділянці «у-з»	$V_{\text{ср}} = \frac{V_c + V_z}{2}$	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
8	Середня питома поверхня охолодження на ділянці «у-з»	$\beta = \frac{F_{\text{срв}}}{V_{\text{ср}}}$	14,72	12,98	12,27	12,00	11,95	12,18	12,62	13,15	13,73	14,34

Таблиця 4.2. Алгоритм проведення мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра з камерою згоряння за схемою «б» для двигуна G80ME-C9-ПІ

№	Найменування	Розрахункова формула	V									
			2	4	6	8	10	12	14	16		
1	Діаметр циліндра, м	$D_{\text{цв}} = \sqrt[3]{\frac{D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6}{V}}$	1,06	0,84	0,73	0,67	0,62	0,58	0,55	0,53		
2	Об'єм камери стиснення, м ³	$V_c = \frac{0,785 \cdot D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6 (1 - \psi_s)}{\varepsilon_d - 1}$	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127		
3	Величина заглиблення частини камери стиснення у поршень (кришку циліндра), м	$h_k = 0,1 D_{\text{цв}}$	0,11	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05		
4	Величина частини об'єму камери стиснення, яка заглиблена у поршень (кришку циліндра), м ³	$V_k = \frac{\Pi \cdot h_k \left(\frac{D_{\text{цв}}^2}{4} + h_k^2 \right)}{6}$	0,047	0,024	0,016	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006		
5	Поверхня охолодження частини камери стиснення, що заглиблена у кришку (або у поршень) циліндра, м ²	$F_k = \Pi \cdot \left(\frac{D_{\text{цв}}^2}{4} + h_k^2 \right)$	0,92	0,58	0,44	0,36	0,31	0,28	0,25	0,23		
6	Поверхня охолодження циліндра у т. «с», м ²	$F_c = \frac{4(V_c - V_k)}{D_{\text{цв}}} + F_k + 0,785 \cdot D_{\text{цб}}^2$	2,10	1,63	1,47	1,41	1,38	1,36	1,36	1,37		
7	Об'єм циліндра в т. «з», м ³	$V_z = \rho \cdot V_c$	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19		
8	Поверхня охолодження циліндра в т. «з», м ²	$F_z = \frac{4(V_z - V_k)}{D_{\text{цв}}} + F_k + 0,785 \cdot D_{\text{цб}}^2$	2,34	1,93	1,82	1,79	1,79	1,80	1,82	1,85		
9	Середня величина поверхні охолодження циліндра на ділянці «y-z», м ²	$F_{\text{cp}} = \frac{F_c + F_z}{2}$	2,22	1,78	1,65	1,60	1,58	1,58	1,59	1,61		
10	Середній об'єм циліндра на ділянці «y-z», м ³	$V_{\text{cp}} = \frac{V_c + V_z}{2}$	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16		
11	Середня питома поверхня охолодження на ділянці «y-z», м ⁻¹	$\beta = \frac{F_{\text{cp}}}{V_{\text{cp}}}$	13,0	10,87	10,14	9,84	9,97	9,8	9,87	9,97		

Таблиця 4.3. Алгоритм проведення мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра з камерою згоряння за схемою «в» для двигуна G80ME-C9-ПІ

№	Найменування	Розрахункова формула	v								
			2	4	6	8	10	12	14	16	
1	Діаметр циліндра для v-го варіанту, м	$D_{\text{цв}} = \sqrt[3]{\frac{D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6}{v}}$	1,06	0,84	0,73	0,67	0,62	0,58	0,55	0,53	
2	Об'єм камери стиснення, м³	$V_c = \frac{0,785 \cdot D_{\text{цб}}^2 \cdot S_6 (1 - \psi_{s,1})}{\varepsilon_{\text{д}} - 1}$	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	
3	Величина заглиблення частини камери стиснення у поршень (кришку циліндра), м	$h_{\text{к}} = 0,1 D_{\text{цв}}$	0,11	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	
4	Величина частини об'єму камери стиснення, яка заглиблена у поршень (кришку циліндра), м³	$V_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{к}} \left(3 \frac{D_{\text{цв}}^2}{4} + h_{\text{к}}^2 \right)}{6}$	0,047	0,024	0,016	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006	
5	Поверхня охолодження частини камери стиснення, заглибленої у кришку циліндра (поршень), м²	$F_{\text{к}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{цв}}^2}{4} + h_{\text{к}}^2 \right)$	0,92	0,58	0,44	0,36	0,31	0,28	0,25	0,23	
6	Поверхня охолодження циліндра у т. «с», м²	$F_{\text{с}} = \frac{4(V_{\text{с}} - 2 \cdot V_{\text{к}})}{D_{\text{цв}}} + 2 \cdot F_{\text{к}}$	1,96	1,54	1,40	1,35	1,33	1,32	1,32	1,33	
7	Об'єм циліндра в т. «з»	$V_{\text{з}} = \rho \cdot V_{\text{с}}$	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
8	Поверхня охолодження циліндра в т. «з», м²	$F_{\text{з}} = \frac{4(V_{\text{з}} - 2 \cdot V_{\text{к}})}{D_{\text{цв}}} + 2 \cdot F_{\text{к}}$	2,38	1,95	1,84	1,80	1,80	1,81	1,83	1,86	
9	Середня величина поверхні охолодження на ділянці «y-z», м²	$F_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{с}} + F_{\text{з}}}{2}$	2,17	1,74	1,62	1,58	1,56	1,57	1,58	1,59	
10	Середній об'єм циліндра на ділянці «y-z», м³	$V_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{с}} + V_{\text{з}}}{2}$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
11	Питома поверхня охолодження циліндра на ділянці «y-z», м⁻¹	$\beta = \frac{F_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}}$	11,16	9,4	8,99	8,92	8,98	9,09	9,24	9,39	

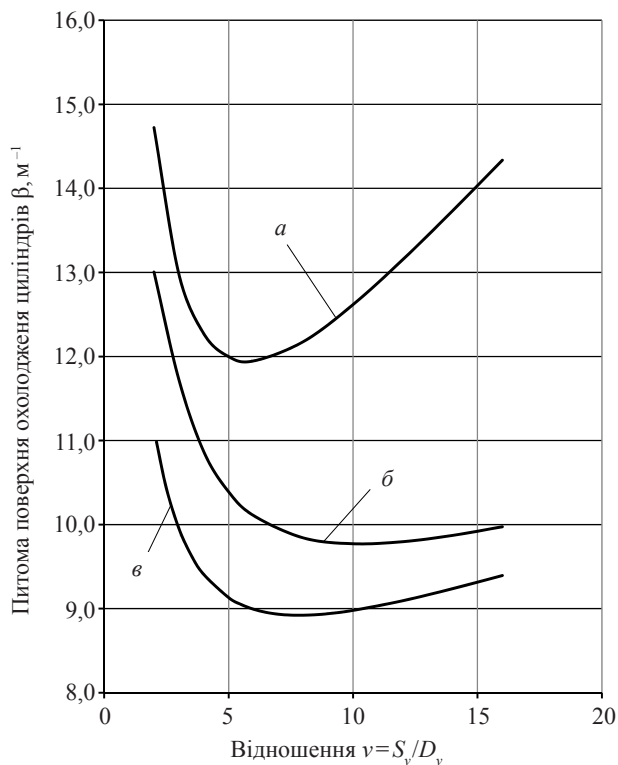


Рис. 4.2. Результати мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра для двигуна G80ME-C9-ТІІ

Наведені на рис. 4.2 залежності показують, що двигуни з циліндричною формою камери стиснення (схема «а») є малоефективними, що не можна рекомендувати для головних малообертових двигунів, а двигуни з камерою стиснення за схемою «б» є найбільш ефективними з точки зору зменшення теплових втрат.

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Який позитивний результат дає процес мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра двигуна?
2. Чому проведення мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра дає позитивний результат лише для ультрадвоходових двигунів?
3. Як впливає форма камери згоряння на результат мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра?
4. Як впливає величина ступеня стиснення на результат розрахунку мінімізації?
5. Поясніть, з якою формою камери стиснення двигун буде мати мінімальні втрати питомої величини витрати теплової енергії?
6. Обґрунтуйте та дайте рекомендації щодо найбільш оптимальної форми камери стиснення для двигунів.

5 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ІНДИКАТОРНОГО ККД ЦИКЛУ ВІД РОЗМІРІВ ЦИЛІНДРА ($D_{ц}$, S)

Як було сказано раніше, математична модель «Індикаторний цикл» є узагальненою формою опису усіх внутрішніх процесів, які відбуваються у циліндрі ДВЗ. Це дає можливість проводити дослідження впливу абсолютних розмірів циліндра ($D_{ц}$, S), співвідношення ходу поршня до діаметру циліндра ($S/D_{ц}$) та інше на показники ефективності двигуна.

В якості приклада у посібнику наведені результати дослідження вказаних факторів на індикаторні показники двигунів з циліндричною камерою стиснення.

Для камер стиснення, форми яких значно відрізняються від циліндричної (наприклад, півкульова або кульова), результати наведені в розділі 4 даного посібника.

На рис. 5.1 наведені залежності індикаторного ККД від розмірів циліндра (об'єму циліндра).

Для цих залежностей характерні три області.

Область I (рис. 5.1, *а*) характерна для двигунів з особливо малим об'ємом циліндрів (автотракторні двигуни).

Область II (рис. 5.1, *а*) характерна для двигунів СОД та МОД (двигуни наземного та водного транспорту).

Область III (рис. 5.1, *б*) характерна для двигунів з особливо великим об'ємом циліндра (суднові головні двигуни).

Наведені на рис. 5.1 залежності підтверджують відому із практики експлуатації двигунів тезу, що більш великі двигуни мають кращі економічні показники, ніж двигуни з малим об'ємом циліндра.

Це моделювання підтверджує не тільки якісну сторону, але дає можливість провести кількісну оцінку такої залежності.

На другому етапі моделювання вирішувалось питання залежності індикаторного ККД двигуна від співвідношення ходу поршня до діаметра циліндра (S/D). Як відомо, при різних співвідношеннях S/D змінюється частка поверхні охолодження по відношенню до об'єму камери згорання.

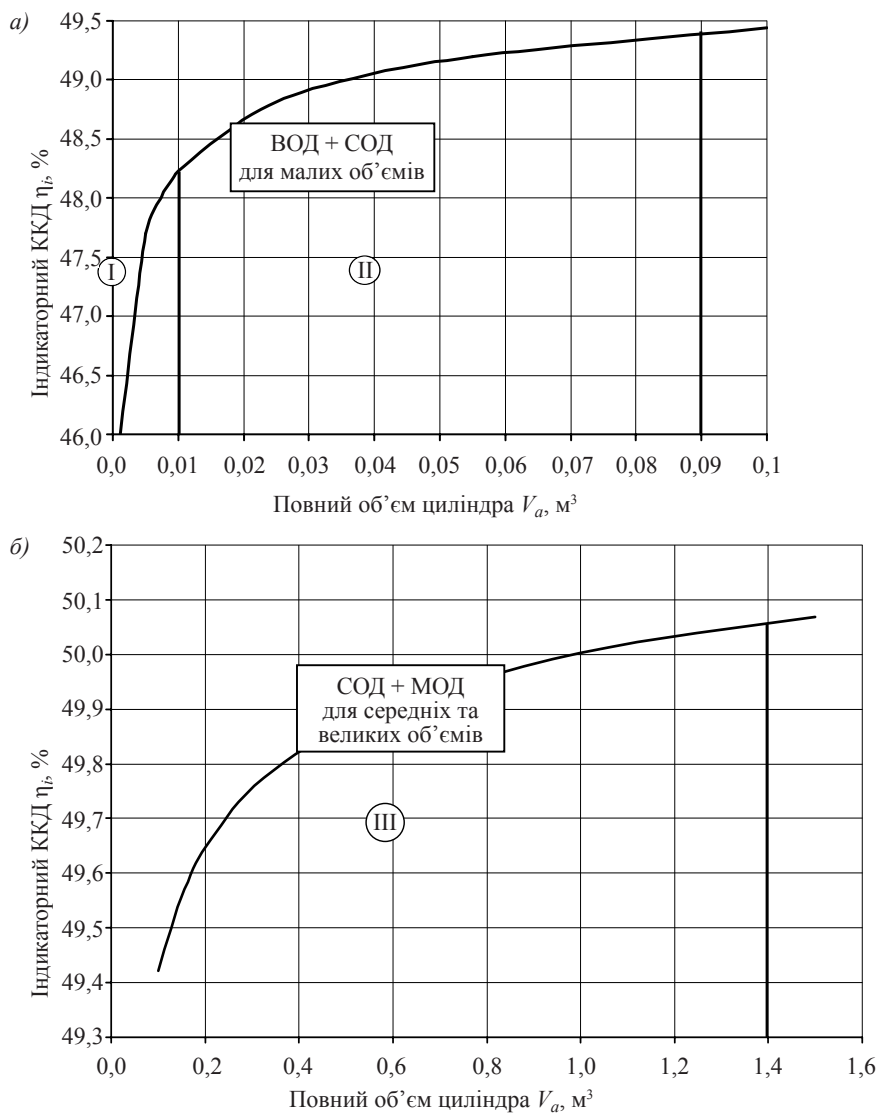


Рис. 5.1. Залежність індикаторного ККД від об'єму циліндра:

а — для високо- та середньообертових двигунів малих об'ємів;

б — для середньо- та малообертових двигунів великих об'ємів

Цій частці дамо назву фактор форми робочого тіла, під яким слід розуміти відношення:

$$K_{\phi} = \frac{F_{\text{ох}}}{V_{\text{кз}}},$$

де $F_{\text{ох}}$ — внутрішня поверхня циліндра, через яку йдуть втрати теплоти від робочого тіла, м^2 ;

$V_{\text{кз}}$ — об'єм робочого тіла, який формується поверхнею охолодження (в деяких випадках з метою спрощення в якості об'єму робочого тіла можна прийняти об'єм камери згоряння $V_{\text{кз}}$). Таке припущення можливе для приблизної оцінки фактору форми робочого тіла в період інтенсивного тепло-виділення.

На фактор форми робочого тіла найбільший вплив має співвідношення хода поршня до діаметра циліндра (S/D). У зв'язку з цим на рис. 5.2 показана залежність індикаторного ККД від співвідношення S/D .

На рис. 5.2 виділені три характерні зони.

Зона I характерна для короткоходових двигунів, для яких ККД різко зростає при збільшенні S/D .

В зоні II при зростанні S/D іде повільне зростання ККД.

В зоні III починається падіння ККД після того, як відношення досягне $S/D > 4,0$.

До вищенаведеного слід додати, що з метою найбільшої достовірності отриманих результатів при першому моделюванні (рис. 5.1) для різних об'ємів зберігаються сталими наступні параметри:

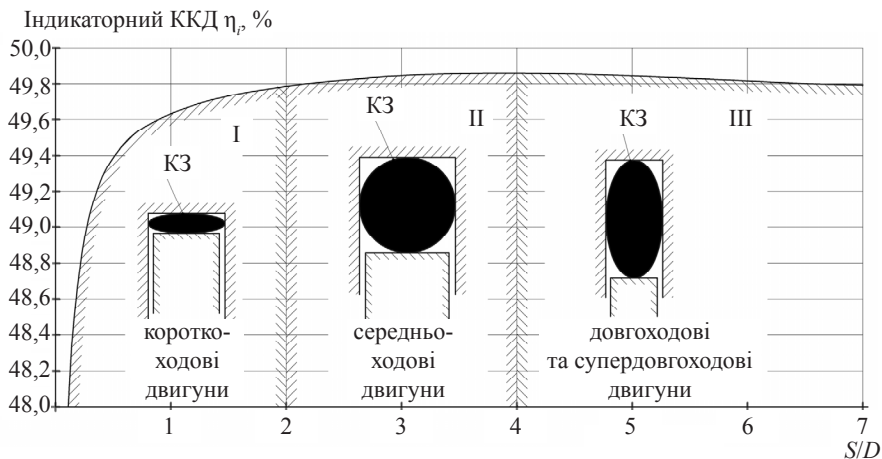


Рис. 5.2. Залежність індикаторного ККД від співвідношення S/D

Ступінь стиску робочого тіла	$\epsilon = 15$
Коефіцієнт надлишку повітря при згорянні палива	$\alpha = 2,4$
Співвідношення	$S/D = 2$
Температура заряду циліндра	$T_a = 330 \text{ K}$
Тиск в циліндрі	$P_a = 0,34 \text{ МПа}$

При другому моделюванні (рис. 5.2) всі попередні вихідні дані практично зберігаються сталими, додатково зберігається сталим об'єм циліндра, але змінюється співвідношення S/D .

Наведених детальних пояснень зі створення моделей усіх складових повного індикаторного циклу повністю достатньо для розуміння технології побудови будь-яких математичних моделей, які покращують розрахунки при вивченні теорії робочих процесів.

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Використовуючи дані посібника (рис. 5.2), дайте пояснення: чому дизельні двигуни з великими розмірами циліндра ($D_{ц}$, S) без проблем пускаються навіть в умовах низьких температур, а двигуни з невеликими розмірами циліндра мають проблеми, пов'язані з пуском?
2. За рахунок чого можна полегшити пуск двигунів з малим розміром циліндра?
3. Як впливає ступінь стиснення на пускові якості ДВЗ?
4. Як впливає співвідношення S/D на пускові якості двигуна?
5. Як впливає тиск в кінці стиснення та максимальний тиск в циліндрі на пускові якості ДВЗ?

6 СКЛАДАННЯ КРЕСЛЕНЬ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ АБО ДЕТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

6.1 Програмні продукти сьогодення, що пропонують комплексні рішення у галузі сучасного автоматизованого конструювання, аналізу й виготовлення елементів ДВЗ

Аналіз сучасного виробництва вказує на необхідність постійного вирішення складної дилеми: усунення суперечності між якістю технічних проєктів та термінами їх розробки. Повільність під час розробки проєктів призводить до морального старіння технічних рішень. Таким чином, безперервне ускладнення сучасних технічних об'єктів, підвищення вимог до їх надійності, якості і техніко-економічних показників, а також необхідність скорочення термінів розробки, зменшення її трудомісткості, вартості і підвищення ефективності праці інженерів-проектувальників, конструкторів і технологів є основними передумовами автоматизованої технології проєктування (АТП).

Сьогодні на ринку пропонують безліч систем автоматизованого проєктування (САПР) — від найпростіших (шкільного і студентського рівнів) до складних «важких» пакетів, вартість яких обчислюється тисячами доларів за ліцензією. Тому однією з проблем є вибір оптимальної системи САПР, яка буде задовольняти сучасним вимогам, які проєктувальник і конструктор ставлять до апаратно-програмного забезпечення. Найбільш важливими з яких є: оперативність виконання проєктів, великий ресурс, високі технологічні характеристики і якість виконуваних робіт, простота і зручність операторського обслуговування, надійність роботи, цінова доступність

На цей час більшості вимог задовольняють такі системи САПР як SolidWorks, T-Flex, Компас, AutoCAD, що і є найбільш використовуваними та популярними в машинобудуванні. Кожен із цих програмних пакетів буде розглянутий далі детально з описом функціональних можливостей.

Програмний пакет SolidWorks

Продукт SolidWorks компанії SW Corporation (США) представляє собою систему тривимірного твердотілого параметричного проектування механічних вузлів та конструкцій. Система реалізує класичний процес тривимірного параметричного проектування від ідеї до об'ємної моделі, від моделі до креслення.

Незважаючи на легкість освоєння, в SolidWorks реалізуються складні геометричні побудови завдяки використанню об'ємного ядра Parasolid. При цьому можливості твердотілого моделювання, які реалізовані в системі, можна зіставити з можливостями систем «важкого» класу, які працюють на платформі Unix.

Побудова 3D-моделі

Процес побудови 3D-моделі ґрунтується на створенні об'ємних геометричних елементів і виконанні різних операцій між ними. 3D-модель несе в собі найповніший опис фізичних властивостей об'єкта (об'єм, маса, моменти інерції) і дає проектантові можливість працювати у віртуальному 3D-просторі, що дозволяє на найвищому рівні наблизити комп'ютерну модель до вигляду майбутнього виробу, виключаючи етап макетування.

Моделювання в 2D

Після того, як буде створена твердотільна модель деталі або складання, конструктор може автоматизовано отримати креслення з зображеннями всіх основних видів, проекцій, розрізів, а також проставленими розмірами.

Креслення SolidWorks мають двонаправлену асоціативність з 3D-моделями, завдяки чому розміри моделі завжди відповідають розмірам на кресленні. SolidWorks підтримує креслярські стандарти GOST, ANSI, ISO, DIN, JIS, GB і BSI.

Проектування складання

SolidWorks пропонує конструктору досить гнучкі можливості створення вузлів та складань. Система підтримує як створення складання способом «знизу-вверх», тобто на основі вже існуючих деталей, так і «зверху-вниз» (від зборки до деталі).

Проектування складання починається із завдання взаємного розташування деталей однієї щодо іншої, причому забезпечується попередній перегляд просторового зв'язку.

Для циліндрових поверхонь можуть бути задані зв'язки концентричності, для площин — їх співпадіння, паралельність, перпендикулярність або кут взаємного розташування.

Обмін даними з іншими пакетами

Для обміну даними з іншими пакетами, тобто їх трансляції, необхідно забезпечити доступ інших додатків CAD/CAM до створення твердотільної моделі. Система підтримує обмін інформацією через стандартні формати та має наступні особливості:

- більше 20 вбудованих трансляторів (IGES, VDAFS, STEP, Parasolid, ACIS, STL, VRML, DXF, DWG, Pro/ENGINEER, CADKEY, Unigraphics, Solid Edge, Inventor, AUTOCAD, Mechanical Desktop, Adobe PDF і т. ін.);
- редагування й автоматичне зшивання імпортованих поверхонь;
- спеціальні можливості для користувачів AUTOCAD (модуль XchangeWorks), імпорт й експорт креслень з AUTOCAD зі збереженням кольору, шрифтів й шарів.

Сервісні можливості

Значно спрощують роботу такі численні сервісні можливості, як копіювання вибраних конструктивних елементів по лінії або по колу, дзеркальне відображення вказаних примітивів або моделі. Також до сервісних можливостей можна віднести ознаки які включають в себе перегляд і друк, тобто безкоштовний оглядач SolidWorks Viewer; створення креслень, що автономно проглядаються, і моделей eDrawings.

Великий спектр спеціалізованих модулів SolidWorks розширює базову конфігурацію системи і забезпечує вирішення таких прикладних задач в областях CAD/CAM/CAE/PDM, як управління інженерними даними і структурою виробів, електронний архів; маршрутизація документів й управління роботами (потоками завдань).

Відмінні особливості

Відмінними особливостями САПР SolidWorks є: твердотільне і поверхневе параметричне моделювання; повна асоціативність між деталями, складанням і кресленнями; багатий інтерфейс імпорту-експорту геометрії; експрес-аналіз міцності деталей і кінематики механізмів; спеціальні засоби щодо роботи з великим складанням; простота в освоєнні і висока функціональність; гнучкість і масштабованість; стопроцентне дотримання вимог стандартів під час оформлення креслень.

Також однією з основних відмінностей є проектування виробів з урахуванням специфіки виготовлення, що включає такі особливості: листовий матеріал, прес-форми і штампи, зварні конструкції. Тобто ці можливості дають змогу виконувати більшість заданої роботи без застосування додаткових САПР.

Програмний пакет T-FLEX

Система автоматизованого проектування T-FLEX від компанії «Топ Системи» (Росія) дає змогу охопити всі рівні конструкторської підготовки (створення й оформлення креслень, 3D-моделей, конструкторської документації тощо) в різних підрозділах підприємств. САПР T-FLEX ґрунтується на відомому, перевіреному практикою геометричному ядрі Parasolid®, розробленому компанією Siemens PLM Software.

Моделювання в 2D

САПР T-FLEX дозволяє створювати 2D-креслення без наявності тривимірної моделі. В порівнянні з більшістю інших систем твердотілого 3D-моделювання, САПР T-FLEX володіє ширшим набором 2D-інструментів для створення креслень деталей зі складною геометрією, включаючи двовимірну параметризацію, що підтримує необмежену кількість елементів креслення. Зміна будь-якого елемента автоматично переноситься на пов'язані з ним елементи.

Моделювання в 3D

Засоби тривимірного моделювання САПР T-FLEX дають змогу інженеру-конструктору легко створювати як прості деталі, так і складні моделі, що складаються з тисяч компонентів. В системі є можливість використання в одній моделі твердотілого та поверхневого моделювання за допомогою однакових інструментів.

Проектування складання

У САПР T-FLEX легко вирішуються завдання проектування складних 3D-моделей. Є можливість створення складання з безліч деталей, використовуючи методи проектування «знизу-вверх» (від деталі до складання), «зверху-вниз» (від збірки до деталі) або їх комбінацію. 3D-складання в T-FLEX CAD є параметричним, тобто при зміні розміру або розташування будь-якої деталі, інші елементи коригуються автоматично.

Оформлення креслення

Засоби створення різних двовимірних видів-проекцій і набір команд для нанесення елементів оформлення дають змогу швидко отримати 2D-креслення за 3D-моделлю. САПР T-FLEX підтримує оформлення креслень у повній відповідності з міжнародними стандартами (ISO, DIN, ANSI). Система надає засоби для формування специфікацій в форматах, що передбачені стандартами.

Обмін даними з іншими пакетами

САПР T-FLEX може імпортувати та експортувати файли різних форматів. З найбільш поширеними CAD-системами обмін даними проводиться через формати: Parasolid, IGES, STEP, Rhino, STL, DWG, DXF тощо. Існує також можливість виведення графічних зображень креслень і моделей у різних форматах для оформлення документації, презентацій, використання в Internet.

Сервісні можливості

Користувачі T-FLEX можуть управляти параметричною моделлю дуже простим і зручним способом — створюючи власні діалогові вікна безпосередньо усередині документа. Ці унікальні можливості не потребують навичок програмування або додаткового програмного забезпечення. Існує можливість створення за допомогою САПР T-FLEX CAD і T-FLEX Open API додатків для Internet, що використовують параметричні можливості системи, наприклад, для демонстрації каталогів готових виробів, реалізації спеціальних додатків проектування або проведення маркетингу виробів, що розробляються підприємством.

САПР T-FLEX — програма, побудована на технології Unicode, що дає змогу працювати з будь-якими мовами.

Особливості програмного пакета

Використання параметризації та адаптивних елементів у САПР T-FLEX значно спрощує процедуру внесення до моделі змін. Ці функціональні можливості дозволяють автоматично розповсюдити необхідні зміни на проект вцілому.

САПР T-FLEX створює специфікацію складання й автоматично оновлює дані в таблиці специфікації при зміні складу складальної моделі. Набір прототипів специфікації може бути змінений або розширений за бажанням конструктора. Набір спеціальних команд забезпечує ефективне моделювання деталей, що створюються з листового металу, дає змогу отримати розгортку й оформити креслення початкової заготовки.

САПР T-FLEX дає можливість використання ухилів граней, створення ліній роз'єму або поверхні роз'єму, зміни геометрії 3D-моделі з урахуванням чинника усадки матеріалу, виконання розділення виробу. Вбудований модуль міцнісного експрес-аналізу пропонує зручний у роботі набір інструментів для перевірки створюваних моделей безпосередньо в T-FLEX. Результати елементного аналізу дозволяють інженеру-конструктору виявити потенційні недоліки моделі в процесі її проектування, оцінити допустимі навантаження і виникаючу напругу.

Програмний пакет AutoCAD

Американська компанія Autodesk є одним з визнаних лідерів на світовому ринку в області розробки систем САПР. Цією компанією створений пакет AutoCAD, який займає провідне місце в світі серед програм, що автоматизують конструкторську діяльність. Перша версія програми з'явилася в 1982 р.

AutoCAD — універсальний графічний пакет, призначений для будь-якого фахівця, що працює з технічною або презентаційною графікою. Розробники системи, орієнтуючись на найширший круг користувачів, заклали в пакет багаті можливості пристосовування AutoCAD до будь-яких наочних областей. Проте таке пристосовування, що включає створення блоків і слайдів, написання програм на Автоліспі і СІ вимагає деякого часу і зусиль. На підприємствах така робота, як правило, виконується системним програмістом, який готує систему, проводить навчання фахівців і модифікує систему. Така організація праці дозволяє швидко і ефективно застосовувати AutoCAD на практиці і не відволікати фахівців від їх прямих професійних обов'язків.

AutoCAD — потужний фундамент САПР, який має нову технологію і вдосконалений функціональний набір. Продуктивний, стабільний, сучасний інструмент, з яким інженери, архітектори, конструктори зустріли третє тисячоліття, придбав нові риси, сотні змін знайшли віддзеркалення в переробленому інтерфейсі, нових можливостях і технології проектування. Розвиток функціональних можливостей AutoCAD можна розділити на наступні напрями.

Моделювання в 3D

Система AutoCAD дозволяє створювати як прості елементи, так і складні поверхні, тверді тіла. Базові типи просторових моделей, що використовуються в CAD-системах, можна умовно поділити на три групи:

- каркасні моделі;
- поверхневі моделі;
- твердотільні моделі.

Твердотільне моделювання — основний вид тривимірного проектування виробів у машинобудуванні. Створені тіла сприймаються системою як єдині об'єкти, що мають певний об'єм. Твердотільне моделювання дозволяє не тільки ефективно вирішувати компоновочні задачі, але і визначати інерційно-масові характеристики, а також отримувати необхідні види, розрізи і перетини просторового об'єкта для оформлення робочої документації.

Проектування складання

Складання в AutoCAD — це тривимірна модель, яка об'єднує моделі деталей та стандартних виробів (всі вони називаються компонентами складання).

Проектування складання «знизу-вверх» представляє собою послідовне додавання у складання деталей (компонентів), яке супроводжується встановлюванням їх взаємного розташування. Послідовність складання моделі аналогічна реальному процесу складання.

Проектування складання «зверху-вниз» полягає у моделюванні компонентів складання безпосередньо у самому складанні.

Частіше за все на практиці використовується змішаний спосіб проектування, який об'єднує способи проектування «знизу-вверх» та «зверху-вниз».

Створення асоціативних видів

Тривимірні моделі деталей створюються не тільки для наглядної візуалізації, але й з метою отримання конструкторської документації, у тому числі креслень деталей.

Система AutoCAD дозволяє створювати асоціативні креслення тривимірних деталей. В таких кресленнях всі види пов'язані з моделлю. Зміни у моделі призводять до зміни зображення у кожному асоціативному виді.

Ефективне робоче середовище

За допомогою нових надзвичайно доступних інструментів і інтерфейсу, спеціально розробленого для підвищення продуктивності, AutoCAD дозволяє проектувальникам концентруватися більшою мірою на проектах, і у меншій мірі уділяти час введенню параметрів з клавіатури. Такі функції, як багатозадачне середовище проектування Multiple Design Environment, центр управління AutoCAD DesignCenter, підтримка Intellimouse і безліч інших, підтримують природне та інтуїтивне ефективне робоче середовище. Вдосконалений доступ і зручність AutoCAD забезпечує поліпшений доступ до даних.

Ці переваги роблять програмне забезпечення більш прозорим протягом всього циклу проектування. Контекстні меню надають негайний доступ до команд, що найбільш часто використовуються.

Підвищення зручності використання САПР AutoCAD

AutoCAD пропонує цілий ряд удосконалень, які підвищують ефективність виведення на друк. Користувачі отримали велику зручність при роботі з фінальним представленням креслення за допомогою управління розкладкою листа і стилями виведення на друк. Вони можуть навіть напряму публікувати креслення AutoCAD на вузлах Web як електронні роздруки (eplot) у форматі DWF.

Відмінні особливості AutoCAD

1. Багатозадачне середовище проектування Multiple Design Environment (MDE). Іншими словами, це багатовіконний інтерфейс, який відповідає

стандартам Windows і надає інтелектуальне середовище, що підвищує продуктивність і полегшує роботу з програмою. За допомогою MDE можна переміщатися між кресленнями без переривання команди і інтегрувати раніше напрацьовану проектну інформацію в поточні розробки. MDE пропонує безліч можливостей, включаючи такі функції, як:

- одночасне відкриття декількох креслень. AutoCAD дає можливість відкривати безліч файлів при підтримці стандартних функцій Windows креслень в одному сеансі роботи AutoCAD;

- перенесення і копіювання об'єктів. Ця функція дає можливість копіювання або перенесення об'єктів всередині або між кресленнями простим перетягуванням їх мишею за принципом drag&drop. Перенесення креслення або файлу з натисненням правої кнопки миші з Windows Explorer дає можливості відкриття, вставки, приєднання зовнішнього посилання XREF, копіювання об'єкту OLE або створення гіперпосилання;

- підтримка копіювання властивостей. За допомогою натискання миші можна копіювати властивості об'єктів, такі як колір, шар, тип лінії, масштаб типу лінії та інші, з одного креслення в інше;

- Вирізати/Копіювати/Вставити. Ця функція дозволяє копіювати об'єкти усередині креслення або з одного креслення в інше через clipboard усередині одного сеансу роботи AutoCAD. Крім того, є можливості завдання базової крапки при вставці, або вставки в початкові координати;

- перемикання між кресленнями без переривання поточної команди.

2. Центр управління AutoCAD Design Center (ADC), схожий на Windows Explorer, надає більш інтуїтивний і ефективний діалоговий інтерфейс для роботи з елементами креслення. За допомогою ADC можна переглядати і копіювати дані з будь-якого креслення — відкритого зараз чи ні. Можна перегортувати вміст креслення: блоки, визначення шарів, розкладки листа і зовнішні посилання з безлічі джерел, вставляючи ці дані в поточне креслення. Якщо блок і цільове креслення мають привласнені одиниці вимірювання, то блок автоматично масштабується відповідно до одиниць вимірювання креслення.

Центр управління AutoCAD DesignCenter також надає могутній інструмент пошуку, дозволяючий відшукати креслення, використовуючи інформацію про вміст креслення: назви шарів або блоків, коротка інформація про креслення або дата виконання креслення. AutoCAD Design Center може бути також використаний як «віртуальна палітра» будь-яким додатком ObjectARX, якому необхідно представляти об'єкт для використання усередині креслення.

3. Нові засоби для роботи в тривимірному просторі, побудовані на основі нового математичного ядра ACIS 4.0, дозволяють створювати такі моделі, про які раніше можна було тільки мріяти: створення оболонок, редагування

ребер, граней і тіл (подібність, копіювання, поворот, зсув, видалення, зміна кольору і т.д.). Засіб навігації в тривимірному просторі 3D Orbit дозволяє динамічно обертати каркасні і півтонові об'єкти, динамічно змінюючи режим зафарбовування, проекцію і т.п.

4. Редагування зовнішніх посилань і блоків в основному кресленні. Вперше в AutoCAD з'явилася можливість редагувати зовнішні посилання, не відкриваючи нове креслення, працюючи з ними прямо в головному кресленні, як із звичайними об'єктами, зберігаючи зміни в зовнішній файл.

5. Розкладки листа (Layouts). Нова функція розкладок листа в AutoCAD дає користувачеві можливість створювати безліч просторів листа для одного креслення. Користувачі тепер можуть візуально компоувати креслення на віртуальному «листі» паперу. Використання розкладок листа дає можливість об'єднати декілька варіантів друку (на різні пристрої, на листи різного формату, з використанням різних стилів і т.п.) в одному файлі креслення. Це в значній мірі скорочує час і зусилля, що вимагаються для установки і конфігурації файлів креслень для друку.

6. Видові екрани. В AutoCAD видові екрани можуть бути задані будь-якою замкненою формою. Ця функція робить більш ефективним використання простору креслення з погляду презентаційних можливостей і дотримання стандартів оформлення креслення.

Нова панель інструментів для управління видовими екранами дозволяє користувачам привласнювати видовим екранам стандартні коефіцієнти масштабування: 1:1, 1:5, 1:100, а також дає можливість задавати довільний масштаб. Після завдання масштабу для видового екрану можна заблокувати цей масштабний коефіцієнт, забороняючи операції масштабування зображення в даному екрані. Крім того, з використанням діалогового вікна управління видовими екранами можна задати розкладки видових екранів стандартних прямокутних проекцій.

За допомогою нової функції Hyperlinks користувачі можуть підключати гіперпосилання до об'єктів AutoCAD, а потім послідовно передавати цей зв'язок будь-якому файлу DWG, файлу документа в Windows, адресі URL і т.п. Діалогове вікно вставки гіперпосилань і нова панель інструментів для роботи з Web володіють потужними функціями, прості у використанні і узгоджуються з іншими офісними додатками. Характерний курсор дає динамічний відгук при попаданні в кресленні на об'єкт з гіперпосиланнями. Подібно кнопкам навігації *Вперед* і *Назад*, схожі кнопки на панелі інструментів для роботи з Web дозволяють переміщатися між web-серверами, документами Word, електронними таблицями Excel, кресленнями AutoCAD і іншими файлами.

6.2 Приклади побудови тривимірних моделей деталей двигунів на базі прийнятих конструктивних рішень за допомогою програмного пакету AutoCAD

Алгоритм побудови тривимірної моделі втулки циліндра двигуна 6ЧСН18/22

Робота розпочинається з використання шаблону, який містить необхідні початкові установки: межі креслення, одиниці вимірювання, шари, а також текстовий та розмірний стилі.

Побудова виконується в декілька етапів.

Підготовчий етап

Досліджуємо деталь (рис. 6.1), уявно розділяючи її на прості складові геометричні форми. Втулка циліндра має тільки поверхні обертання складної форми, тому її краще будувати за допомогою команди *Revolve* (Обертання).

Для зручності роботи треба ввести панелі інструментів: *View* (Вид), *UCS* (Системи координат), *Solids* (Тіла), *Solids Editing* (Редагування тіл).

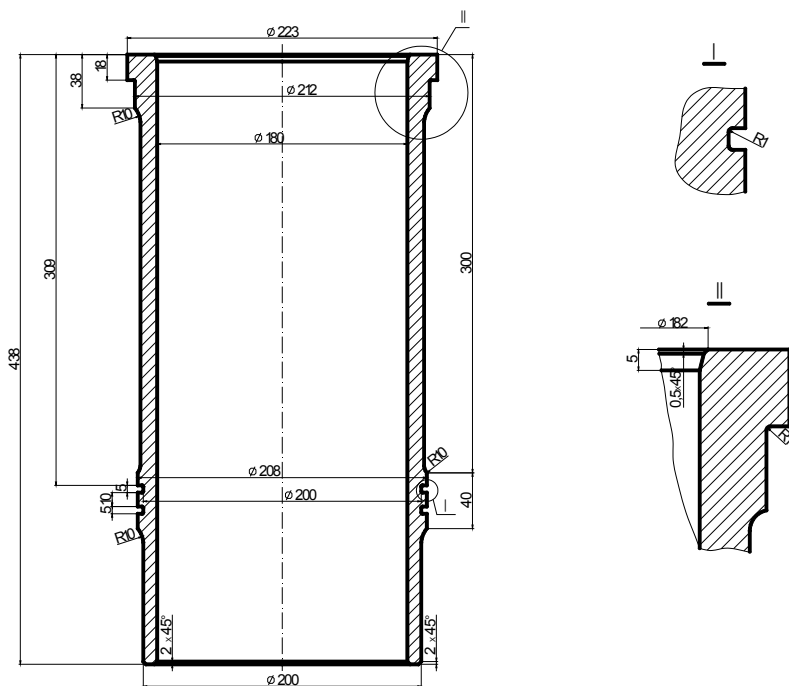


Рис. 6.1. Конструктивна схема втулки циліндра 6ЧСН18/22

Етап побудови елементів, які створюють контур втулки циліндра

В панелі інструментів UCS (Системи координат) вибираємо *Front View* (Фронтальний вид).

За приведеним кресленням втулки циліндра, дотримуючись розмірів всіх елементів, будемо замкнений контур та осьову лінію (рис. 6.2), які будуть використовуватись при виконанні команди *Revolve* (Обертання).

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднуємо побудований контур в область.

Етап створення твердотільного об'єкта

За допомогою команди *Revolve* (Обертання) виконуємо обертання замкненого контуру навколо вертикальної осі.

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Revolve*.

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати контур для обертання.

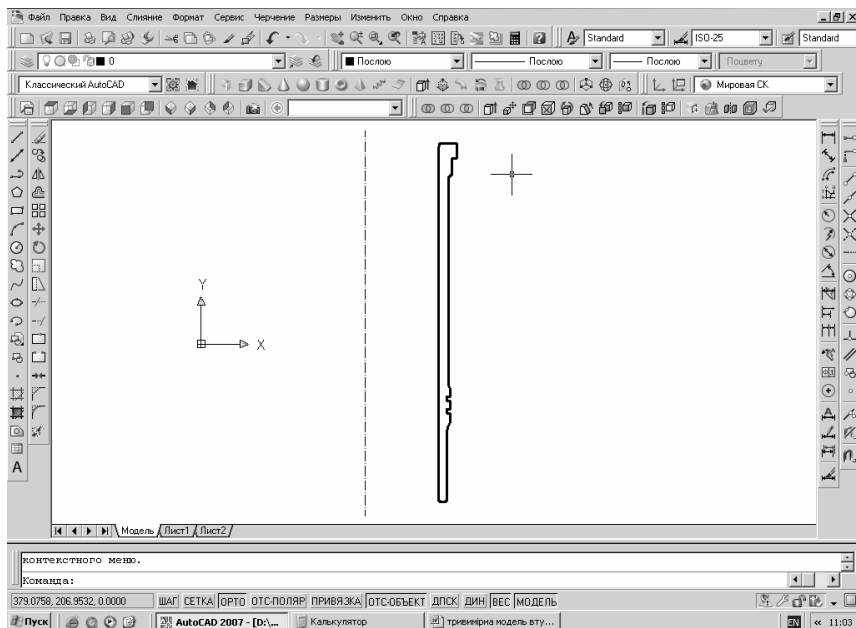


Рисунок 6.2. Замкнений контур та осьова лінія, створені для виконання команди *Revolve* (Обертання)

2. Вказати дві точки на осі обертання.
3. Задати значення кута обертання (в даному випадку 360°).

В панелі інструментів UCS (Системи координат) активізуємо ізометричний вигляд.

Для створення затіненого зображення із меню *View* вибираємо команду *Shade*. Після цього зображення моделі втулки циліндра має вигляд, показаний на рисунку 6.3.

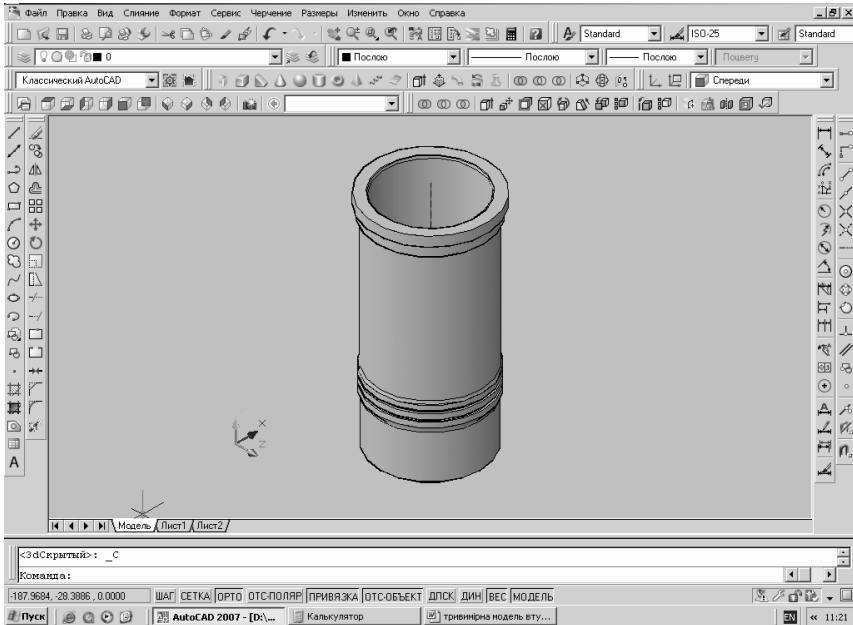


Рисунок 6.3. Тривимірна модель втулки циліндра

Алгоритм побудови тривимірної моделі випускного клапана двигуна 6ЧСПН18/22

Побудова виконується в декілька етапів:

1. Підготовчий етап.
2. Побудова тарілки клапана.
3. Побудова стержня клапана.
4. Побудова хвостовика клапана.
5. Редагування геометрії моделі клапана.

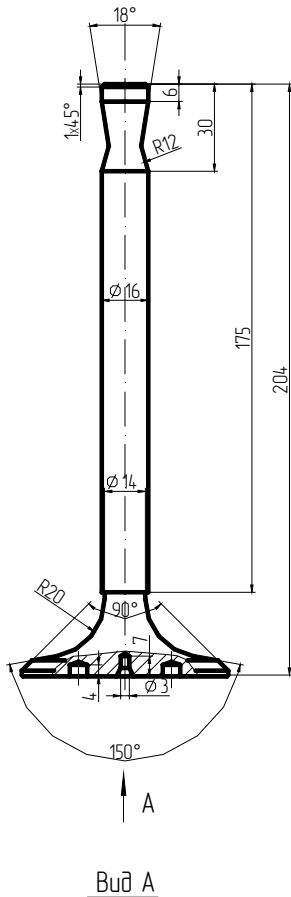


Рис. 6.4. Конструктивна схема випускного клапана двигуна 6ЧСПН18/22

Підготовчий етап

Досліджуємо деталь (рис. 6.4), уявно розділяючи її на прості складові геометричні форми. Клапан має тільки поверхні обертання складної форми, тому його можна побудувати за допомогою команди *Cylinder* (Циліндр), *Revolve* (Обертання).

Для зручності роботи треба ввести панелі інструментів: *View* (Вид), *UCS* (Системи координат), *Solids* (Тіла), *Solids Editing* (Редагування тіл).

Етап побудови елементів, які створюють тарілку клапана

В панелі інструментів *UCS* (Системи координат) вибираємо *Front View* (Фронтальний вид).

За приведеним кресленням клапана, дотримуючись розмірів, будуємо замкнений контур та осьову лінію для побудови тарілки клапана. При цьому використовуються команди *Line* (Лінія), *Fillet* (Спряження), *Chamfer* (Фаска) *Trim* (Обрізати). Для побудови ліній під кутами 90° та 150° можна використовувати відносні полярні координати або режим *Polar*.

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднуємо побудований контур в область (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Замкнений контур і осьова лінія, створені для побудови тарілки за допомогою команди *Revolve* (Обертання)

За допомогою команди *Revolve* (Обертання) виконуємо обертання замкненого контуру навколо вертикальної осі (рис. 6.6).

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Revolve*.

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати контур для обертання.
2. Вказати дві точки на осі обертання.
3. Задати значення кута обертання (в даному випадку 360°).

Етап побудови стержня клапана

Стержень клапана представляє собою циліндр. Тому для його побудови можна використати команду *Cylinder* (Циліндр) з панелі інструментів *Solids* (Тіла).

В панелі інструментів *UCS* (Системи координат) активізуємо ізометричний вигляд.

За допомогою об'єктної прив'язки центр основи стержня задаємо в точці центра верхньої частини тарілки клапана. Після цього треба задати радіус основи та висоту циліндра. На рис. 6.6 показана твердотільна модель тарілки і стержня.

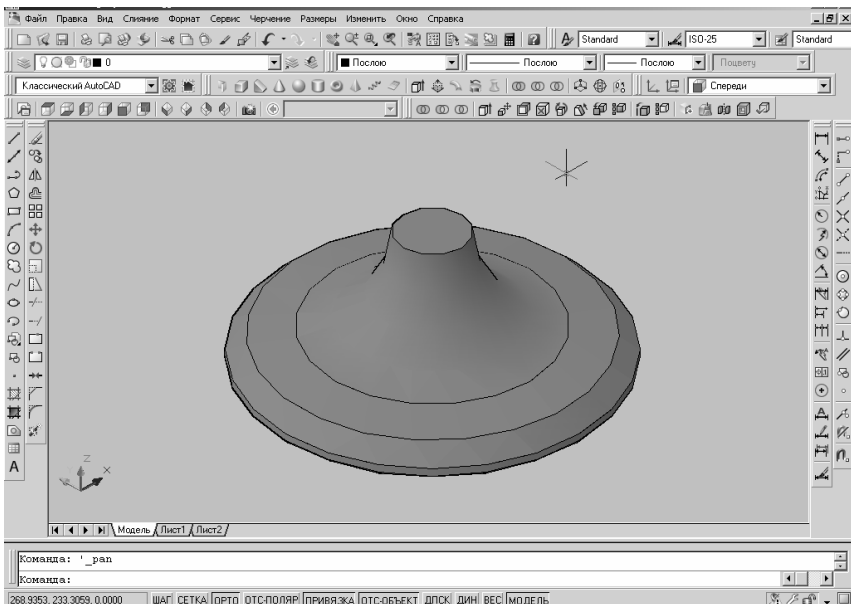


Рисунок 6.6. Створення твердотільної моделі тарілки

Для створення затіненого зображення із меню *View* вибираємо команду *Shade* (рис. 6.7).

Етап побудови хвостовика клапана

В панелі інструментів *UCS* (Системи координат) вибираємо *Front View* (Фронтальний вид).

Хвостовик можна представити як тіло обертання. Тому для його побудови використовується команда *Revolve* (Обертання).

За допомогою команд *Line* (Лінія), *Arc* (Дуга), *Chamfer* (Фаска) будуємо контур хвостовика (рис. 6.8). Починати будувати контур треба з центру верхньої основи стержня.

Використовуючи команду *Region* (Область), об'єднуємо побудований контур в область.

Для створення твердотільної моделі хвостовика використовуємо команду *Revolve* (Обертання) (рис. 6.9).

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Revolve*.

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати контур для обертання.

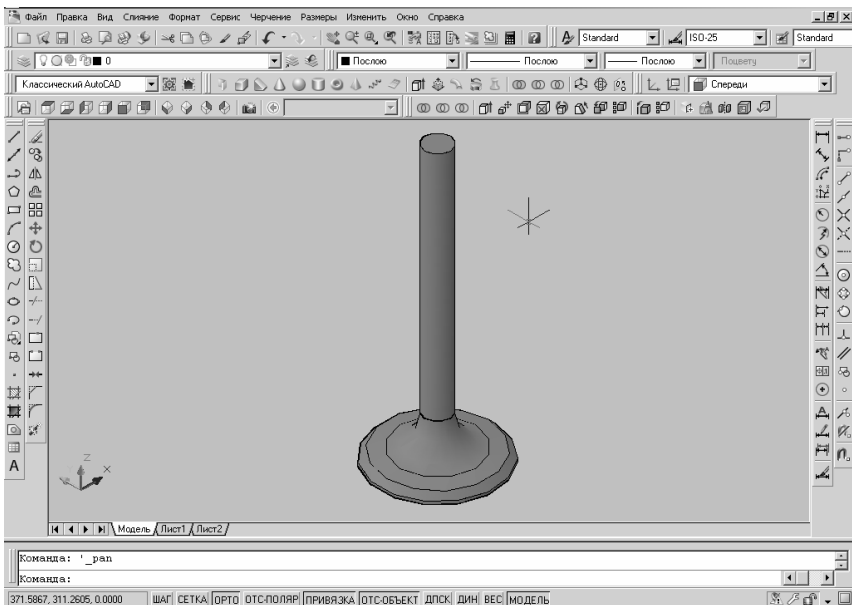


Рис. 6.7. Твердотільна модель тарілки і стержня

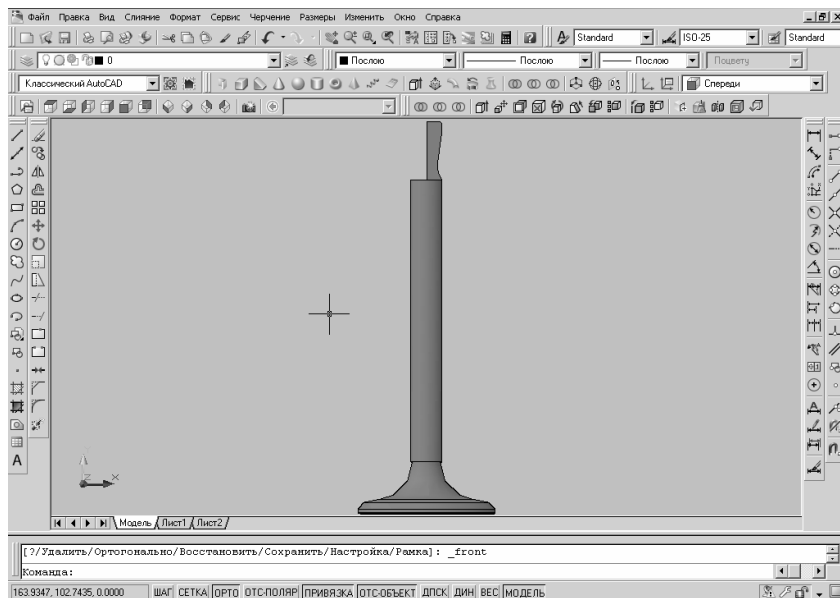


Рисунок 6.8. Замкнений контур для побудови тривимірної моделі хвостовика

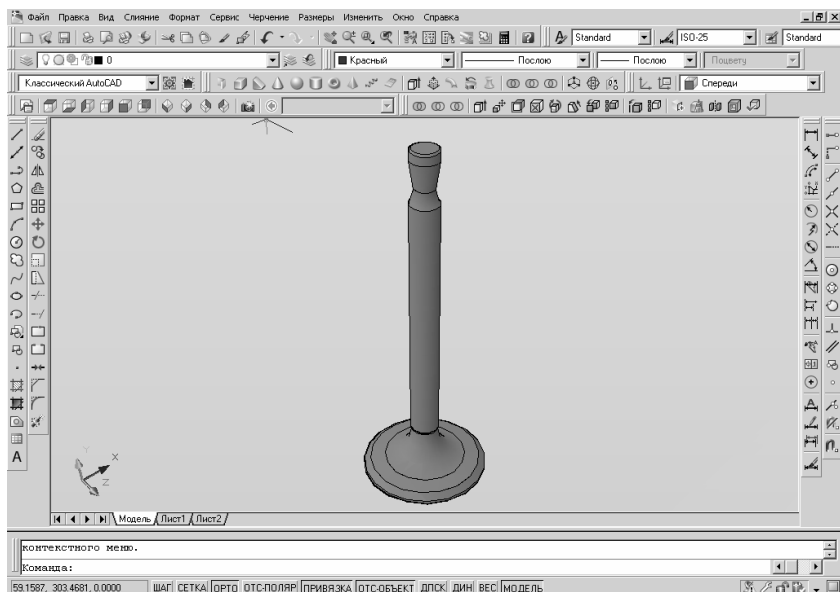


Рисунок 6.9. Тривимірна модель клапана

2. Вказати дві точки на осі обертання.
3. Задати значення кута обертання (в даному випадку 360°).

Етап редагування геометрії моделі клапана

Об'єднуємо три частини клапана (тарілку, стержень, хвостовик) в одну модель за допомогою команди *Union* (Об'єднати) із меню *Solids Editing* (Редагування тіл).

Для побудови отворів тарілки треба побудувати два циліндри діаметром 6 мм та один циліндр діаметром 3 мм. Площина, в якій знаходяться нижні основи цих циліндрів, повинна співпадати з нижньою основою тарілки. В центрі отвору діаметром 3 мм треба побудувати відсічений конус з діаметром нижньої основи 6 мм, верхньої — 3 мм.

Для створення отворів (рис. 6.10) застосовуємо команду *Subtract* (Відняти) із меню *Solids Editing* (Редагування тіл).

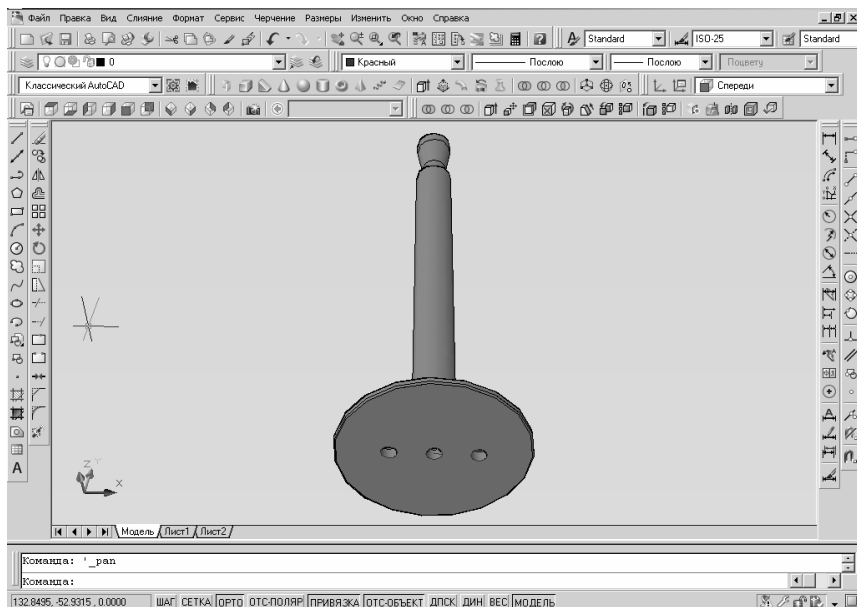


Рис. 6.10. Остаточний вигляд тривимірної моделі клапана

Алгоритм побудови тривимірної моделі поршня двигуна 6ЧСПН18/22

Побудова виконується в декілька етапів:

1. Підготовчий етап.
2. Побудова стінок циліндра.

3. Побудова бобишок.
4. Редагування геометрії моделі поршня.

Підготовчий етап

Досліджуємо деталь, уявно розділяючи її на прості складові геометричні форми. Поршень має тільки поверхні обертання складної форми, тому його можна побудувати за допомогою команди *Cylinder* (Циліндр), *Revolve* (Обертання).

Для зручності роботи треба вивести панелі інструментів: *View* (Вид), *UCS* (Системи координат), *Solids* (Тіла), *Solids Editing* (Редагування тіл).

Етап побудови стінок циліндра

В панелі інструментів *UCS* (Системи координат) вибираємо *Front View* (Фронтальний вид).

За приведеним кресленням, дотримуючись розмірів, будуємо замкнений контур та осьову лінію для побудови поршня. При цьому використовуються команди *Line* (Лінія), *Fillet* (Спряження), *Chamfer* (Фаска), *Trim* (Обрізати).

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднуємо побудований контур в область (рис. 6.11).

За допомогою команди *Revolve* (Обертання) виконуємо обертання замкненого контуру навколо горизонтальної вісі (рис. 6.12).

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Revolve*.

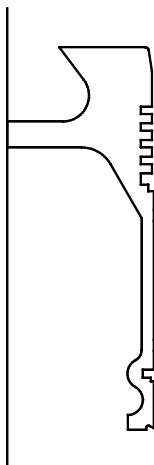


Рис. 6.11. Замкнений контур і осьова лінія, створені для побудови поршня за допомогою команди *Revolve* (Обертання)

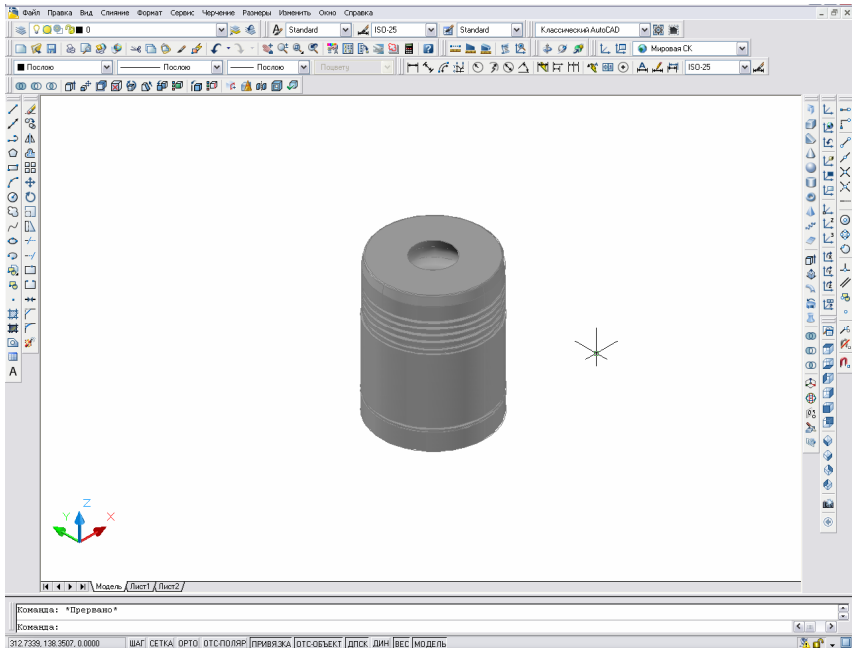


Рис. 6.12. Створення твердотільної моделі поршня

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації команди *Revolve* треба:

1. Вибрати контур для обертання.
2. Вказати дві точки на осі обертання.
3. Задати значення кута обертання (в даному випадку 360°).

Для створення затіненого зображення із меню *View* вибираємо команду *Shade*.

Етап побудови бобишок

1). Встановлюємо систему координат таким чином, щоб площина XY була паралельна площині основи циліндра. Виконуємо допоміжні побудови для визначення центру основи циліндра. Створюємо бобишку за допомогою команди *Cylinder* (рис. 6.13).

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Cylinder*.

Командний рядок: *Cylinder*.

Після активації цієї команди треба:

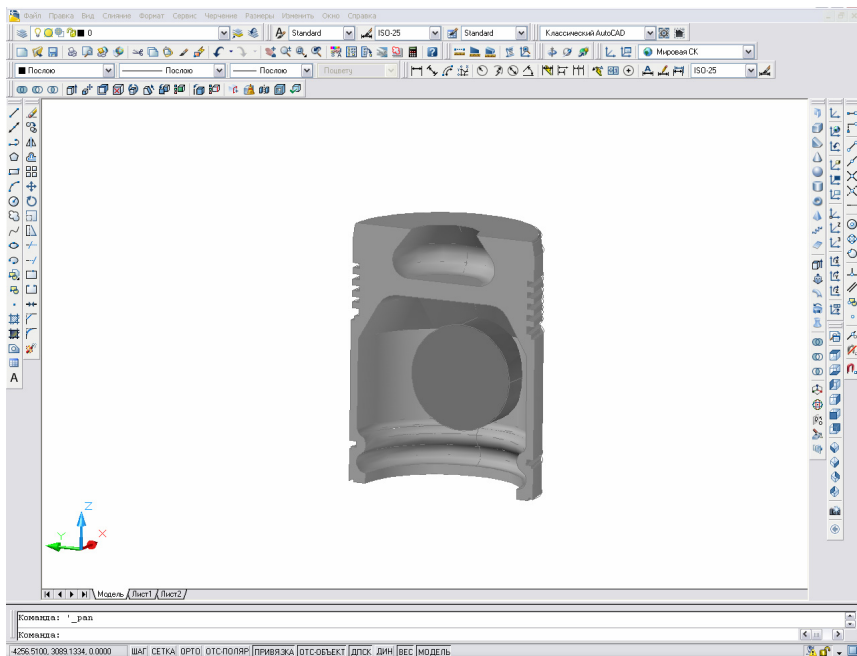


Рисунок 6.13. Побудова циліндра діаметром 100 мм

1. Вказати координати центра основи.
2. Задати значення радіуса циліндра 50 мм.
3. Задати значення висоти циліндра 45 мм.

2). Виконуємо дзеркальну копію отриманого циліндра за допомогою команди *3D Mirror*.

Меню: *Modify* → *3D Operation* → *3D Mirror*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати об'єкт для побудови дзеркальної копії (циліндр діаметром 100 мм).
2. Трьма точками визначити площину дзеркального відображення (площина проходить через осьову поршня).
3. Дати відповідь на питання про видалення базового об'єкту.

Об'єднати поршень з побудованими бобишками за допомогою команди *Union*.

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Union*.

Командний рядок: *Union*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, які треба об'єднати (поршень та бобишки).
- 3). Виконати спряження циліндра бобишки зі стінками поршня (рис. 6.14).

Панель: *Modify*.

Меню: *Modify* → *Fillet*.

Командний рядок: *Fillet*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати ребро, на якому потрібно побудувати спряження.
2. Вказати радіус спряження.
3. Натиснути клавішу *Enter*.
- 4). Виконання отвору в бобишці.

Встановлюємо систему координат таким чином, щоб площина XY була паралельна плоскості основи циліндра (рис. 6.15). Створюємо циліндр для отвору за допомогою команди *Cylinder*. Циліндр треба виконати таким чином, щоб він повністю перетинав поршень, а його осьова лінія співпадала з осью бобишки.

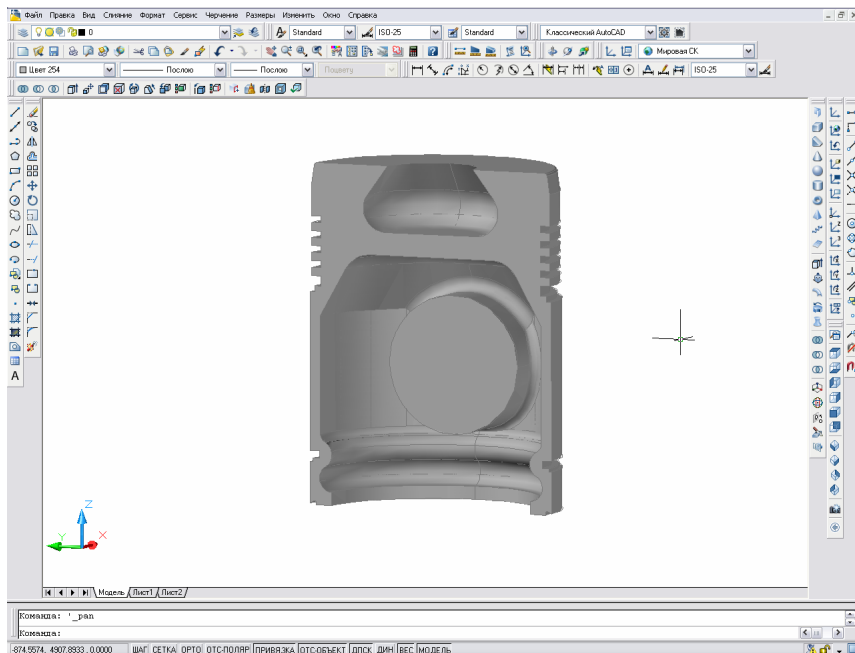


Рис. 6.14. Виконання спряження

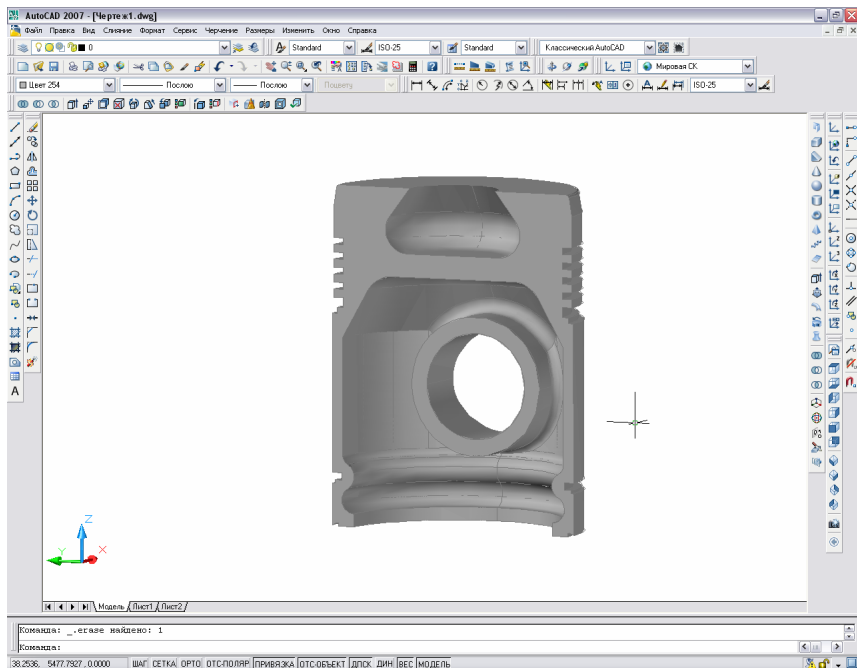


Рис. 6.15. Виконання отвору

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Cylinder*.

Командний рядок: *Cylinder*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вказати координати центра основи.
2. Задати значення радіуса циліндра 37,5 мм.
3. Задати значення висоти циліндра 180 мм.

За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо наскрізні отвори.

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватись віднімання (циліндри бобишок).
2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти (циліндр діаметром 75 мм).

Етап редагування геометрії моделі поршня

1. Побудова отворів у верхній частині поршня. Для отримання отворів треба накреслити циліндри діаметром 3 мм, а потім відняти їх від моделі поршня. Встановлюємо систему координат таким чином, щоб площина ХУ була паралельна плоскості основи циліндра. Виконуємо допоміжні побудови для визначення центру основи циліндра.

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Cylinder*.

Командний рядок: *Cylinder*.

Після активації цієї команди треба:

1. Вказати координати центра основи.
2. Задати значення радіуса циліндра 1,5 мм.
3. Задати значення висоти циліндра 15 мм.

Аналогічно побудувати циліндр під кутом 35°.

За допомогою команди *3D Array* (3D Массив) створюємо по 16 копій кожного циліндра (рис. 6.16).

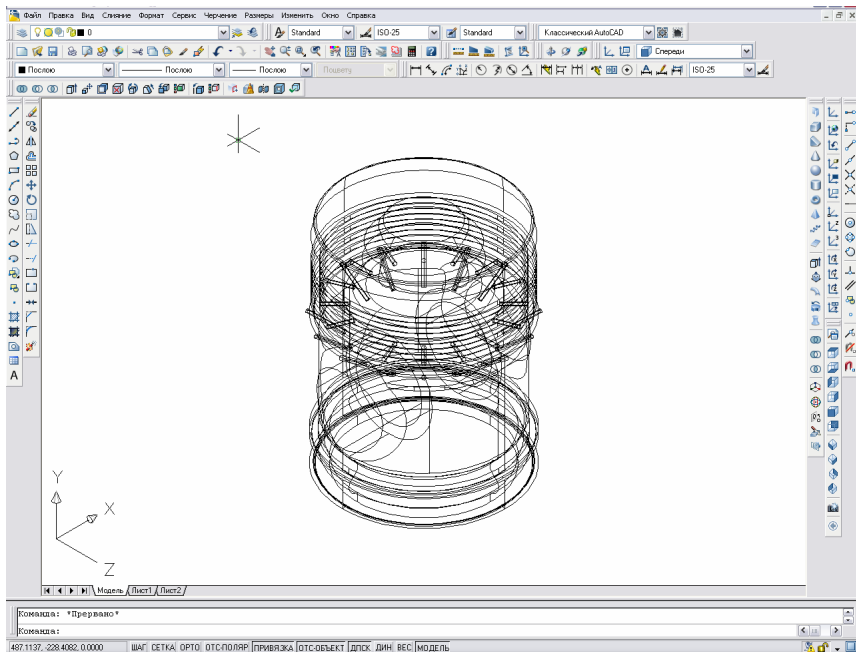


Рисунок 6.16. Побудова тривимірного масиву

Меню: *Modify* → *3D Operation* → *3D Array*.

Командний рядок: *3D Array*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати об'єкт для побудови масиву (циліндр діаметром 4,2 мм).
2. Вказати тип масиву [Rectangular/Polar] <R>:P (круговий).
3. Вказати число елементів в масиві: 3.
4. Вказати кут розташування елементів масиву: 360.
5. Відповісти на питання: Повертати елементи масива? [Yes/No] <Y>:

Yes (Повертати).

6. Вказати центральну точку масиву.
7. Вказати другу точку на осі повороту.

За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо наскрізні отвори (рис. 6.17).

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

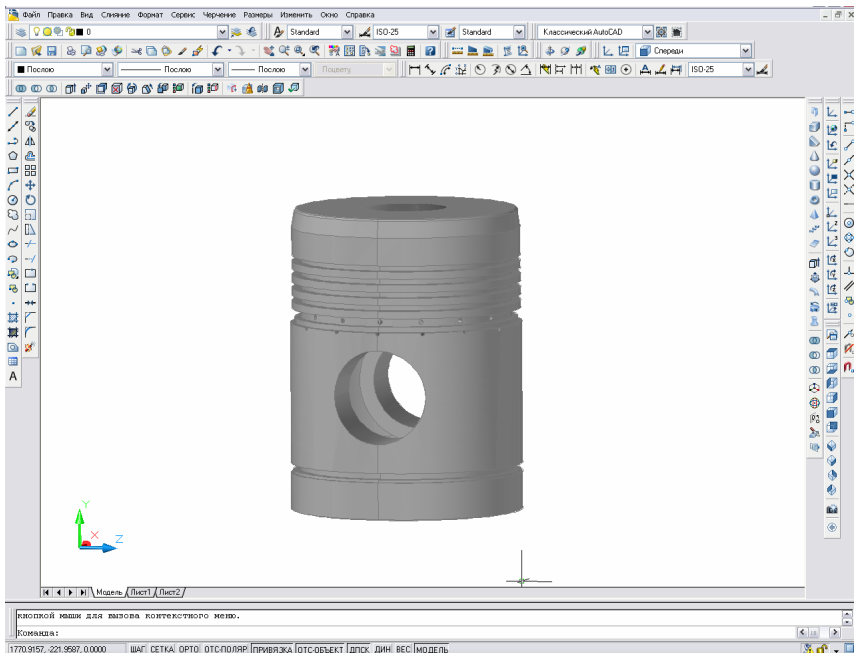


Рис. 6.17. Побудова наскрізних отворів

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватись віднімання (поршень).
 2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти (циліндри діаметром 3 мм)
2. Аналогічно можна виконати отвори у нижній частині поршня (рис. 6.18).

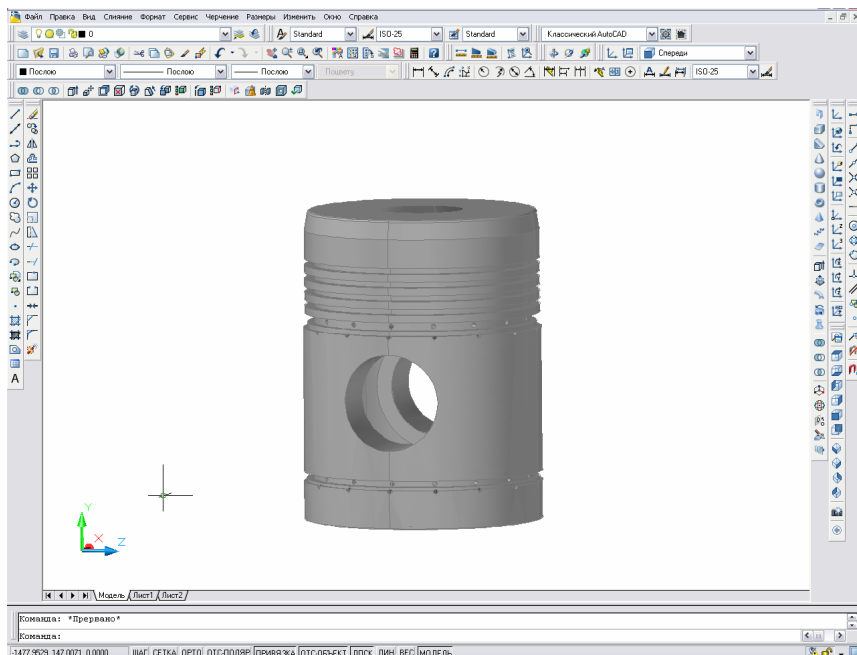


Рис. 6.18. Остаточний вигляд моделі поршня

Алгоритм побудови тривимірної моделі шатунного болта двигуна 6ЧСН18/22

Побудова виконується в декілька етапів:

1. Підготовчий етап.
2. Побудова стержня болта.
3. Побудова отворів.
4. Редагування геометрії моделі болта.

Підготовчий етап

Досліджуємо деталь, уявно розділяючи її на прості складові геометричні форми (рис. 6.19). Шатунний болт має тільки поверхні обертання складної форми, тому його можна побудувати за допомогою команди *Cylinder* (Циліндр), *Revolve* (Обертання).

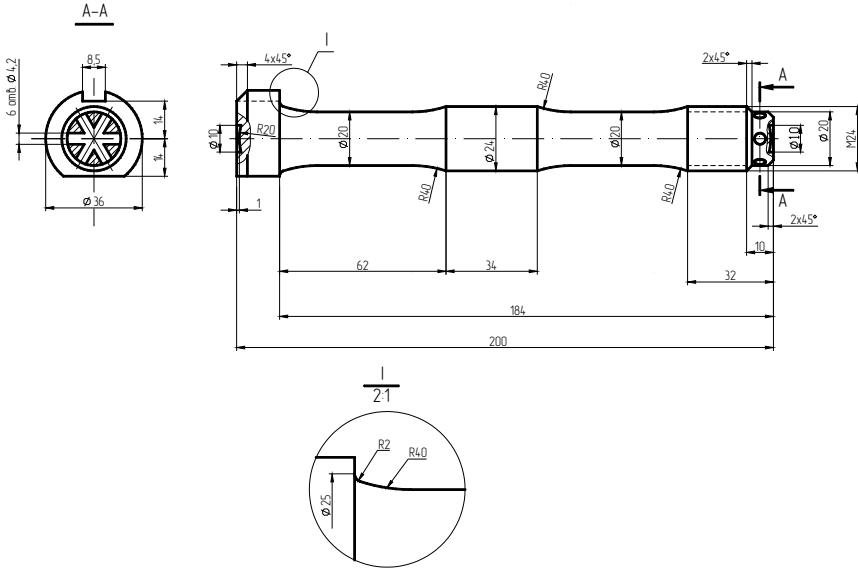


Рис. 6.19. Конструктивна схема шатунного болта движуна 6ЧСП18/22

Для зручності роботи треба вивести панелі інструментів: *View* (Вид), *UCS* (Системи координат), *Solids* (Тіла), *Solids Editing* (Редагування тіл).

Етап побудови стержня болта

В панелі інструментів *UCS* (Системи координат) вибираємо *Front View* (Фронтальний вид).

За приведеним кресленням болта, дотримуючись розмірів, будемо замкнений контур та осьову лінію для побудови стержня болта. При цьому використовуються команди *Line* (Лінія), *Fillet* (Спряження), *Chamfer* (Фаска), *Trim* (Обрізати).

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднуємо побудованих контурів в область (рис. 6.20).

За допомогою команди *Revolve* (Обертання) виконуємо обертання замкненого контуру навколо горизонтальної осі (рис. 6.21).

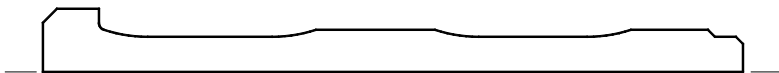


Рис. 6.20. Замкнений контур і осьова лінія, створені для побудови стержня болта за допомогою команди Revolve (Обертання)

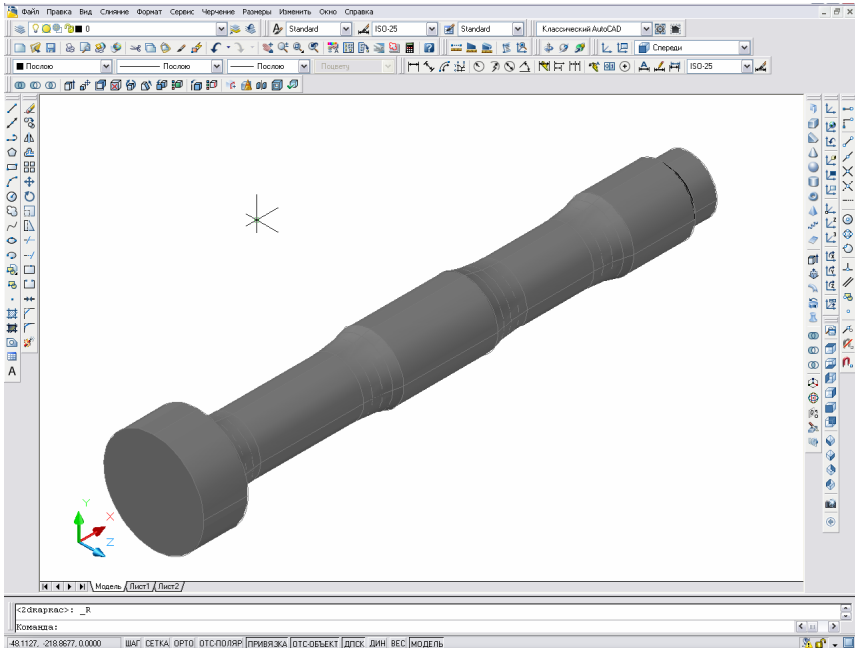


Рис. 6.21. Створення стержня болта

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Revolve*.

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації команди *Revolve* треба:

1. Вибрати контур для обертання.
2. Вказати дві точки на осі обертання.
3. Задати значення кута обертання (в даному випадку 360°).

Для створення затіненого зображення із меню *View* вибираємо команду *Shade*.

Етап побудови отворів

1). В кінцевій циліндричній частині шатунного болта ($\varnothing 20$) за допомогою команди *Cylinder* (Циліндр) будуємо циліндр діаметром 4,2 мм та висотою 24 мм (рис. 6.22).

Панель: *Solids*.

Меню: *Draw* → *Solids* → *Cylinder*.

Командний рядок: *Cylinder*.

Після активації цієї команди треба:

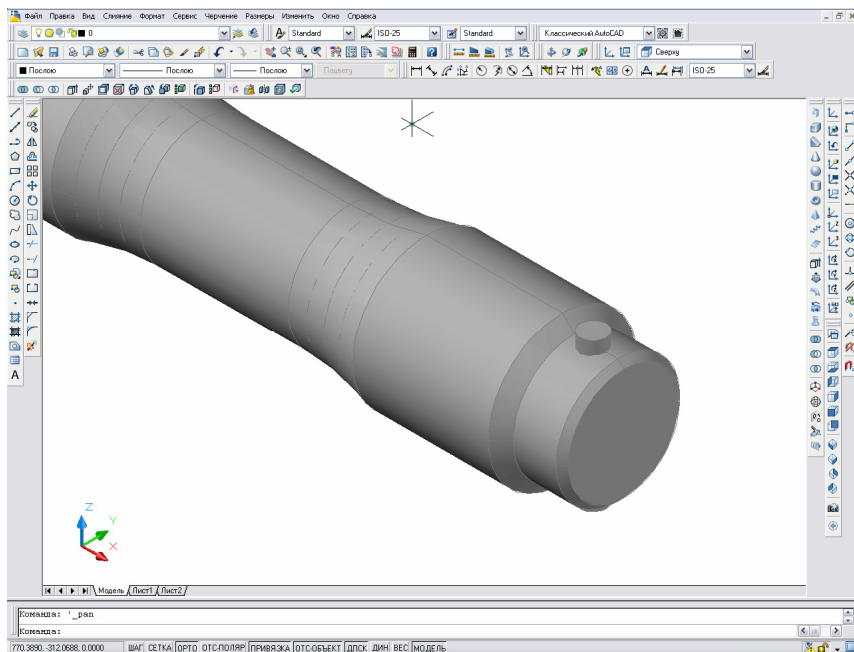


Рис. 6.22. Побудова циліндра діаметром 4,2 мм

1. Вказати координати центра основи циліндра (точку центра треба вибрати так, щоб циліндр після побудови перетинав повністю стержень болта).
2. Задати значення радіуса циліндра 2,1 мм.
3. Задати значення висоти циліндра 24 мм.

2). За допомогою команди *3D Array* (3D Массив) створюємо ще два циліндри для побудови наскрізних отворів (рис. 6.23).

Меню: *Modify* → *3D Operation* → *3D Array*.

Командний рядок: *3D Array*.

Після активації тієї команди треба:

1. Вибрати об'єкт для побудови масиву (циліндр діаметром 4,2 мм).
2. Вказати тип масиву [Rectangular/Polar] <R>:P (круговий).
3. Вказати число елементів в масиві: 3.
4. Вказати кут розташування елементів масиву: 360.
5. Відповісти на питання: Повертати елементи масива? [Yes/No] <Y>: Yes (Повертати).
6. Вказати центральну точку масиву.
7. Вказати другу точку на осі повороту.

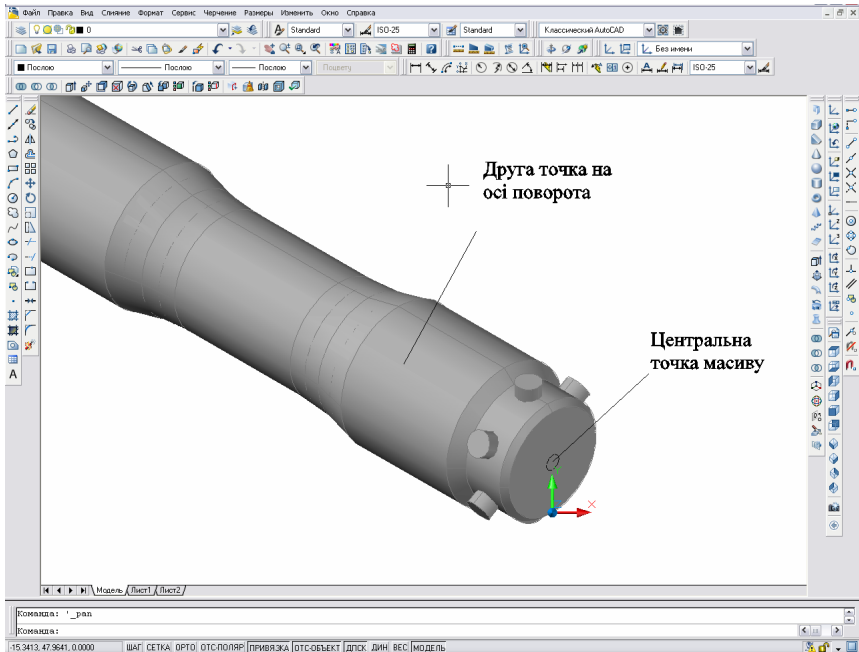


Рис. 6.23. Побудова тривимірного масиву

3). За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо наскрізні отвори (рис. 6.24).

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватись віднімання (стержень болта).
2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти (три циліндри діаметром 4,2 мм).

Етап редагування геометрії моделі шатунного болта

1). Побудова пазу головки болта.

За даними розмірами командою *Line* (Відрізок) побудувати контур для видавлювання.

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднати всі лінії в один контур (рис. 6.25).

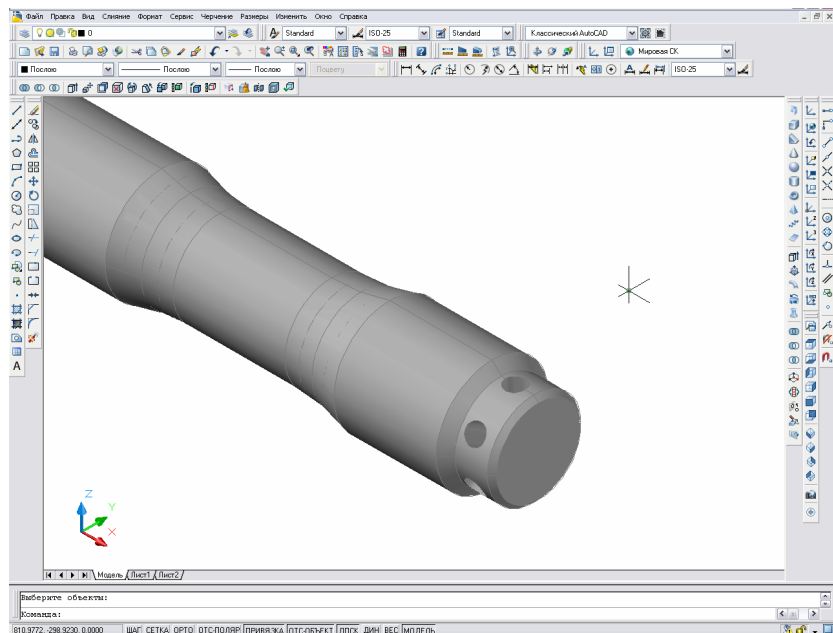


Рис. 6.24. Побудова наскрізних отворів

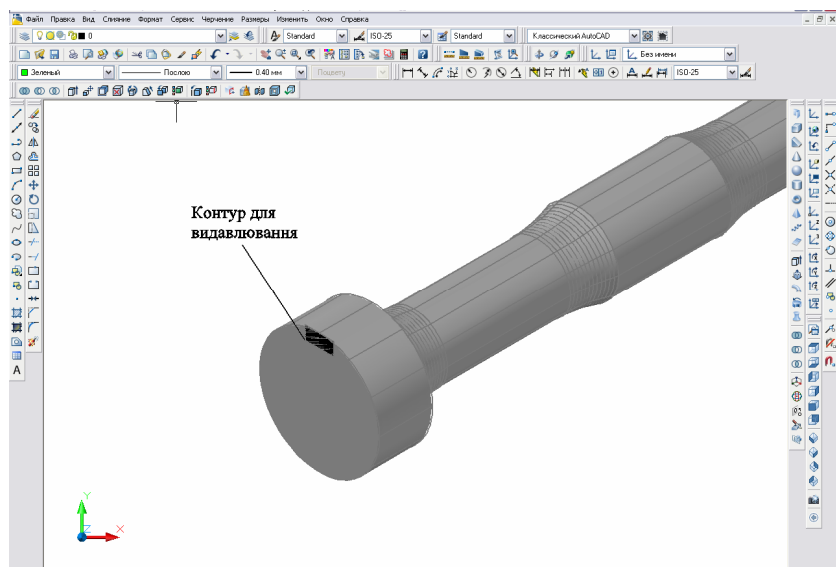


Рис. 6.25. Побудова контуру для видавлювання

З побудованого контуру за допомогою команди *Extrude* (Видавити) отримати паралелепіпед за розмірами пазу.

Панель: *Solids*.

Меню: *Modify* → *Solids* → *Extrude*.

Командний рядок: *Extrude*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати контур для видавлювання.
2. Задати глибину видавлювання: 16.
3. Задати кут видавлювання: 0.

За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо паз (рис. 6.26).

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватись віднімання (головка болта).
 2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти (паралелепіпед).
- 2). Виконання фіксованої частини головки болта.

За даними розмірами командами *Line* (Відрізок), *Circle* (Коло), *Trim* (Обрізати) побудувати контур для видавлювання.

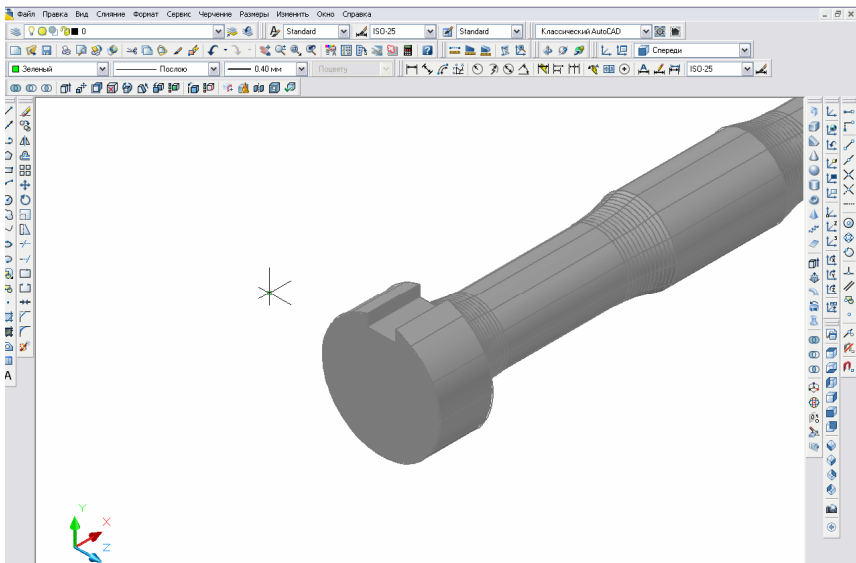


Рис. 6.26. Побудова пазу

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднати всі лінії в один контур (рис. 6.27).

З побудованого контуру за допомогою команди *Extrude* (Видаввити) отримати тіло для віднімання.

Панель: *Solids*.

Меню: *Modify* → *Solids* → *Extrude*.

Командний рядок: *Extrude*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати контур для видавлювання.
2. Задати глибину видавлювання: 16.
3. Задати кут видавлювання: 0.

За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо зріз (рис. 6.28).

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватись віднімання (головка болта).

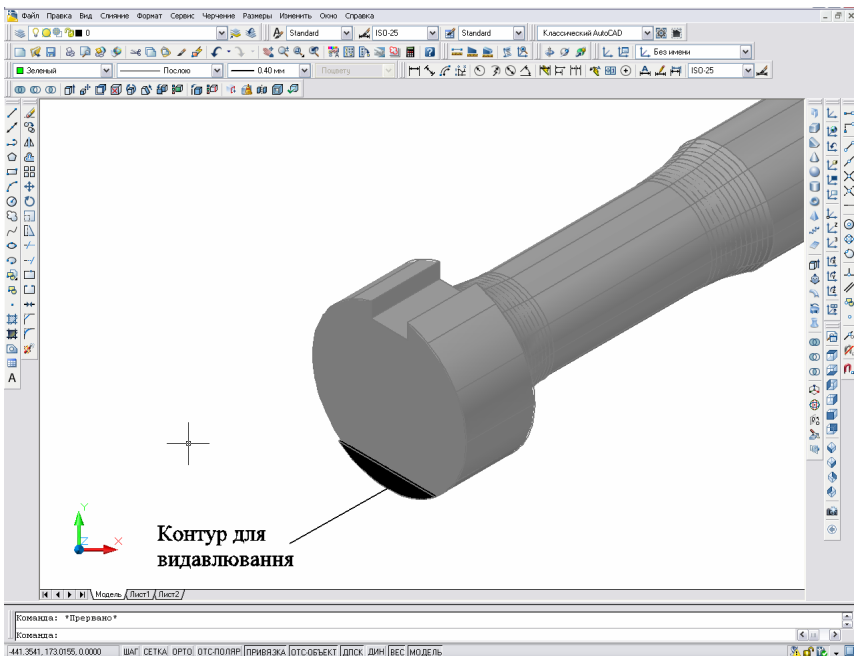


Рис. 6.27. Контур для видавлювання

2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти.

3). Побудова фаски головки болта.

За допомогою команди *Chamfer* виконуємо фаску (рис. 6.29).

Панель: *Modify*.

Меню: *Modify* → *Chamfer*.

Командний рядок: *Chamfer*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати ребро, на якому потрібно побудувати фаску.

2. Задати першу довжину фаски: 4.

3. Задати другу довжину фаски: 4.

4. Ще раз вказати ребро.

4). Побудова технологічних отворів (рис. 6.30).

За даними розмірами командами *Line* (Відрізок), *Circle* (Коло), *Trim* (Обрізати) побудувати контур для побудови тіла обертання.

За допомогою команди *Region* (Область) об'єднати всі лінії в один контур.

З побудованого контуру за допомогою команди *Revolve* (Обертання) отримати тіло для віднімання.

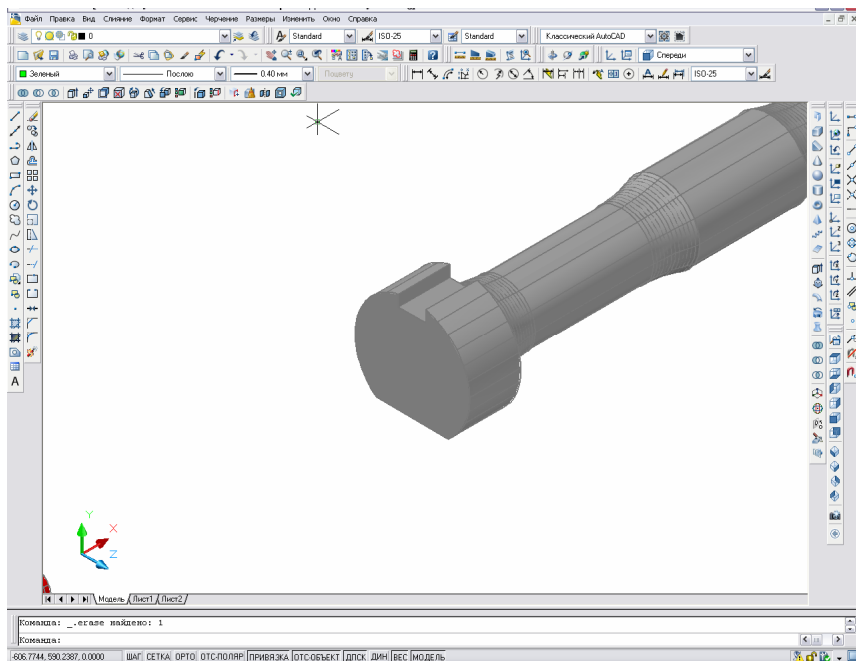


Рис. 6.28. Побудова фіксованої частини головки болта

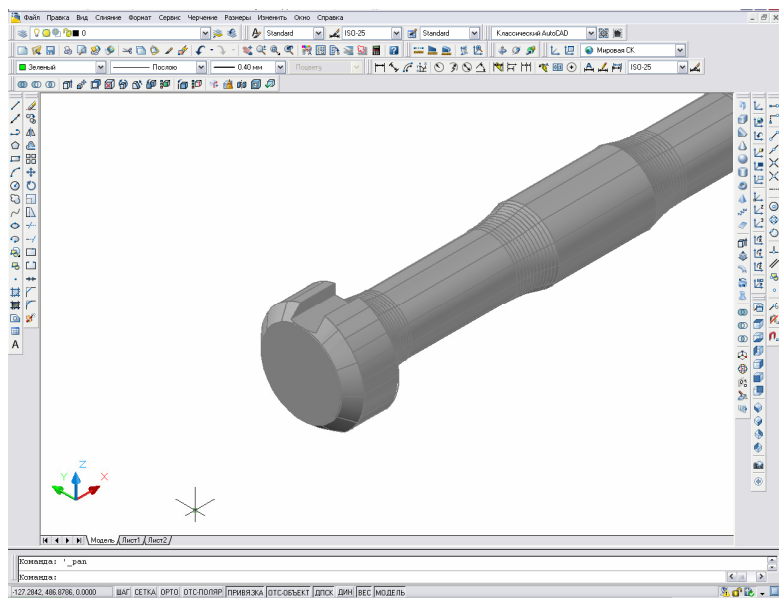


Рис. 6.29. Побудова фаски головки болта

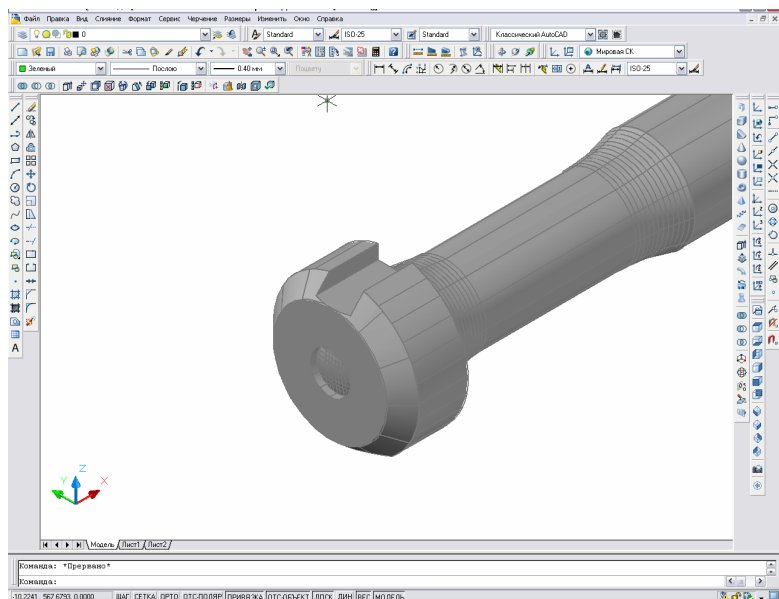


Рис. 6.30. Побудова технологічних отворів

Панель: *Solids*.

Меню: *Modify* → *Solids* → *Revolve*.

Командний рядок: *Revolve*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати контур для обертання.
2. Вказати першу точку на осі обертання.
3. Вказати другу точку на осі обертання.
4. Задати кут видавлювання: 360.

За допомогою команди *Subtract* (Віднімання) виконуємо зріз (рис. 6.30).

Панель: *Solids Editing*.

Меню: *Modify* → *Solids Editing* → *Subtract*.

Командний рядок: *Subtract*.

Після активації команди треба:

1. Вибрати об'єкти, від яких буде здійснюватися віднімання (головка болта).
2. Вибрати об'єкти, які потрібно відняти.

Аналогічний алгоритм для побудови технологічного отвору з протилежного боку шатунного болта.

ПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Які особливості виконання об'ємних зображень циліндрів двигунів?
2. Які особливості виконання об'ємних зображень втулок робочих циліндрів?
3. Які особливості виконання об'ємних зображень колінчастих валів двигунів?
4. Які особливості виконання об'ємних зображень поршнів?
5. Яке робоче середовище AutoCAD є найбільш зручним та пристосованим для створення тривимірних деталей ДВЗ?
6. Назвіть способи побудови зображення твердих тіл.
7. Яка команда дозволяє встановити вигляд тривимірної моделі шляхом вибору точки зору?
8. Як створити зображення з подавленими невидимими лініями?
9. Якими параметрами керують системні змінні *Isolines* та *Facetres*?
10. Назвіть команди для побудови базових твердотільних об'єктів.
11. Які вимоги висувають до об'єктів, що підлягають видавлюванню?
12. Для чого використовуються команди *Union*, *Subtract* та *Intersect*?
13. Яка різниця між командами *Section* та *Slice*?
14. Які команди редагування граней ви знаєте?
15. Як перетворити циліндричну форму отвору на конічну?
16. Які особливості виконання повороту об'єктів у тривимірному просторі?
17. Яка команда використовується для створення зображень з подавленими невидимими лініями?
18. Яка команда масштабування дозволяє відобразити на екрані всі об'єкти креслення?
19. Яка команда дозволяє об'єднувати в один об'єкт декілька твердих тіл?
20. За допомогою якого інструменту можна змінити діаметр циліндричного отвору в твердотільному об'єкті?
21. За допомогою якої команди тривимірні моделі можна перетворити у плоскі види для подальшого створення робочих креслень деталей?

7 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

7.1 Мета самостійної роботи

Як показує досвід вивчення подібних дисциплін, студент обов'язково повинен виконати самостійну роботу, незалежно від того, в якій формі це буде зроблено (домашнє завдання, курсова робота, курсовий проект та інше).

Робота, яка не завершується кінцевим результатом, ніколи не дасть виконавцю впевненості у своїх силах, не знімить бар'єр між теорією та практикою, зведе нанівець попередньо отримані теоретичні знання.

У зв'язку з цим навчальний посібник містить декілька варіантів питань (табл. 7.1), які можна покласти в ту чи іншу форму завдання.

Наведені питання можуть бути основою науково-дослідної роботи будь-якої форми.

При цьому загальна форма роботи зберігається однаковою для всіх студентів, а спеціальна частина обирається з табл. 7.1 з урахуванням порядкового номеру студента.

Таблиця 7.1. Перелік науково-дослідних тем для розділів курсових робіт та проектів

№ вар.	Тема науково-дослідної роботи	Примітка
1	1 Створити математичну модель процесу стиснення в циліндрі (для метода Гріневецького–Мазінга)	
	2 Визначити середній показник політропи стиснення n_1 , використовуючи модель	
	3 Зіставити показник n_1 з показником, отриманим згідно моделі «Індикаторний цикл»	показник n_1 в моделі «Індикаторний цикл» в явній формі не визначається
2	1 Створити математичну модель процесу згоряння палива в циліндрі (для метода Гріневецького–Мазінга)	

№ вар.	Тема науково-дослідної роботи	Примітка
2	2 Визначити величину максимального тиску (p_z) та максимальної температури газів (T_z) за методом Гріневецького–Мазінга	
	3 Зіставити ці величини з даними, отриманими згідно моделі «Індикаторний цикл»	
3	1 Створити математичну модель процесу розширення в циліндрі (для метода Гріневецького–Мазінга)	
	2 Визначити середній показник політропи стиснення n_2 та температуру газів в точці «в» (T_v) за методом Гріневецького–Мазінга	
	3 Зіставити ці значення з даними, отриманими згідно моделі «Індикаторний цикл»	
4	1 Створити математичну модель енергетичного стану потоку повітря при переміщенні з наддувного колектору до робочого циліндра двигуна	
	2 Визначити параметри заряду циліндра наприкінці процесу наповнення циліндра (p_a, T_a), якщо параметри повітря в наддувному колекторі $p_k, T_k = 320$ К	
	3 Визначити коефіцієнт наповнення циліндра η_n	
5	1 Створити комп'ютерну програму для процесу стиснення в циліндрі	
	2 Розрахувати зміну тиску p_z та температури T_z заряду циліндра в залежності від кута повороту кривошипа	
	3 Побудувати графічні залежності тиску p_z та температури T_z від кута повороту кривошипа	
6	Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», розрахувати в залежності від кута повороту кривошипа:	
	1 Температуру газів в циліндрі T_z	
	2 Температуру внутрішньої поверхні стінки циліндра $T_{вг1}$	ручний розрахунок
	3 Температуру зовнішньої поверхні стінки циліндра $T_{вг1}$	ручний розрахунок
7	1 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», розрахувати теплові втрати через втулку циліндра	ручний розрахунок
	2 Визначити термічні напруження в стінці втулки циліндра	ручний розрахунок

Закінчення таблиці 7.1

№ вар.	Тема науково-дослідної роботи	Примітка
7	3 Дати оцінку по запасу міцності втулки циліндра за термічними напруженнями	ручний розрахунок
8	1 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», побудувати залежність тиску газів, температури газів від кута випередження подачі палива ($\varphi_{вп}$)	$\varphi_{вп} = 10^\circ, 8^\circ, 6^\circ, 4^\circ, 2^\circ, 0^\circ, -2^\circ, -4^\circ, -6^\circ, -8^\circ$
	2 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», побудувати залежність індикаторного ККД	
	3 Дати пояснення отриманим залежностям	
9	1 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», визначити закон тепловиділення при згорянні палива	
	2 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», визначити залежність індикаторного ККД від різних кутів подачі палива ($\varphi_{пп}$)	$\varphi_{пп} = 25^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ; \varphi_{вп} = 10^\circ = \text{const}$
	3 Дати пояснення отриманим результатам	
10	1 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні втулки циліндра від кута повороту кривошипа за формулою Ейхельберга	
	2 Використовуючи математичну модель «Індикаторний цикл», визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні втулки циліндра від кута повороту кривошипа за формулою Семенова	
	3 Дати пояснення отриманим результатам	
11	Провести мінімізацію питомої поверхні охолодження циліндра для різних співвідношень S/D та різних конструктивних форм камер стиснення: 1 Циліндричної. 2 Напівкульової. 3 Кульової	

В табл. 7.1 наведені приблизні теми науково-дослідних робіт, які входять до складу курсових робіт та проектів. За вказівкою керівника проектування можуть бути включені інші теми.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Наливайко В.С.** Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. для студентів ВНЗ / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський, С.Г. Ткаченко. — Миколаїв : Топубара В.В. [вид.], 2015. — 332 с.
2. **Наливайко В.С.** Конструктивні вузли та системи судових двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський. — Миколаїв : НУК, 2013. — 100 с.
3. **Наливайко В.С.** Суднові двигуни внутрішнього згоряння. Методичні вказівки до виконання графічно-розрахункових робіт для студентів денної та заочної форм навчання / В.С. Наливайко, С.Г. Ткаченко, В.С. Хоменко — Миколаїв : НУК, 2012. — 72 с.
4. **Ивин В.И., Лапушкин Н.А.** Математическое моделирование процессов в ДВС / В.И. Ивин, Н.А. Лапушкин : изв. вузов. Машиностр. — 1987. — №5. — С. 44–49.
5. Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей : учебник для вузов / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. ; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — К. : Арбис, 1992. — 158 с.
6. **Самсонов В.И.** Двигатели внутреннего сгорания : учебник / В.И. Самсонов, Н.И. Худов. — М. : Транспорт, 1990. — 367 с.
7. **Уваров А.С.** AutoCAD для конструкторов / А.С. Уваров. — М. : Горячая линия–Телеком, 2006. — 399 с.
8. **Гайдышев И.П.** Решение научных и инженерных задач средствами Excel, VBA и C/C++ / И.П. Гайдышев. — БХВ-Петербург, 2004. — 512 с.
9. **Кавтарадзе Р.З.** Теория поршневых двигателей. Специальные главы : учебник для вузов / Р.З. Кавтарадзе — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 720 с.
10. **Кухарёнок Г.М.** Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания : методическое пособие для студентов заочной формы обучения специальности 1-37 01 01 «Двигатели внутреннего сгорания» / Г.М. Кухарёнок. — Минск : БНТУ, 2011. — 62 с.
11. **Дьяченко В.Г.** Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія : підручник / В.Г. Дьяченко ; за ред. А.П. Марченка. — Харків : НТУ «ХПІ», 2008. — 488 с.
12. **Кавтарадзе Р.З.** Локальный теплообмен в поршневых двигателях : учебное пособие для вузов / Р.З. Кавтарадзе. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 592 с.
13. **Ковылов Ю.Л.** Теория рабочих процессов и моделирование процессов ДВС : учебник / Ю.Л. Ковылов. — Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. — 416 с.

14. **Шароглазов Б. А.** Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов : учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев. — Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2004. — 344 с.
15. **Глаголев Н. М.** Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания / Н. М. Глаголев — Киев–Москва : Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1950. — 245 с.
16. **Фомин Ю. Я.** Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник / Ю. Я. Фомин, А. И. Горбань, В. В. Добровольский, А. И. Лукин и др. — Л. : Судостроение, 1989. — 344 с.
17. **Ткаченко С. Г.** Вибір раціональних співвідношень розмірів деталей та розрахункове дослідження процесів двигуна за допомогою методів комп'ютерного проектування : методичні вказівки до курсової роботи / С. Г. Ткаченко, В. С. Хоменко, Р. Ю. Авдюнін. — Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2016. — 32 с.
18. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах. Т. 5. Екологізація ДВЗ. — Підручник для студентів ВНЗ, що навчаються за напрямом «Інженерна механіка» / за редакцією проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А. Ф. Шеховцова. — Харків : Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2004. — 466 с.
19. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах. Т. 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / за редакцією проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України, проф. А. Ф. Шеховцова. — Харків : Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. — 462 с.
20. Двигуни внутрішнього згоряння : Серія підручників у 6 томах. Т. 6. Надійність ДВЗ. / за редакцією проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А. Ф. Шеховцова. — Харків : Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. — 328 с.
21. **Вибє И. И.** Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибє. — Москва, Свердловск : Машгиз, 1962. — 270 с.
22. **Кулешов А. С., Грехов Л. В.** Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. — М. : МГТУ, 2000. — 64 с.
23. **Дьяченко В. Г.** Газообмен в двигателях внутреннего сгорания : учебное пособие / В. Г. Дьяченко. — Киев : УМК ВО, 1989. — 204 с.
24. **Чайнов Н. Д.** Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашиностроение» / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков ; под. ред. Н. Д. Чайнова. — М. : Машиностроение, 2008. — 496 с.
25. Машиностроение : энциклопедия. Т. IV–14 Двигатели внутреннего сгорания. / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков и др. ; под общ. ред. А. А. Александрова и Н. А. Иващенко. — М. : ООО Издательство Машиностроение, 2013. — 784 с.

26. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у 6 томах. Т. 6. Основи САПР ДВЗ / за ред. проф. А. П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А. Ф. Шеховцова. — Харків : Видавн. центр НТУ «ХПІ», 2004. — 428 с.
27. **Хоменко В. С.** Можливості дослідження робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння на основі енергетичного балансу в робочому циліндрі // Збірник наукових праць НУК. — 2009. — № 6 (429). — С. 104–113.
28. **Ткаченко С. Г., Хоменко В. С.** О рациональном соотношении хода поршня (S) и диаметра цилиндра ($D_{ц}$) двигателей внутреннего сгорания // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». — выпуск 22. — Донецк : ДГТУ, 2002. — С. 37–41.
29. **Гончар Б. М.** Численное моделирование рабочего процесса дизелей / Б. М. Гончар. — М. : Энергомашиностроение, 1968.
30. **Андреев А. А.** Комп'ютерні технології у теплотехнічних розрахунках. Частина I : навчальний посібник / А. А. Андреев, О. М. Дудченко, С. А. Лой, В. В. Спіхтаренко, В. С. Цвікліс. — Херсон : Гринь Д. С., 2014. — 244 с.

Інформаційні ресурси

1. Сайт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: <http://www.nuos.edu.ua/>
2. Сайт конференцій НУК: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/>
3. Сайт ХФ НУК: <http://kb.nuos.edu.ua/>
4. Сайт НТУ ХПІ: <http://www.kpi.kharkov.ua/>
5. Сайт DIESEL-RK is an engine simulation tool: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Rus/>
6. Сайт MAN Diesel: <http://dieselturbo.man.eu/>
7. Сайт Wartsila: <http://www.wartsila.com/en/Home>
8. Сайт Caterpillar: <http://www.caterpillar.com/ru.html>
9. Сайт Mitsubishi: <http://www.mhi.co.jp/>
10. Сайт Akasaka Diesels Ltd: <http://www.akasaka-diesel.jp/en/>
11. Сайт Daihatsu Diesel: <http://www.dhtd.co.jp/ja/index.html>
12. Сайт Niigata: <http://www.niigata-power.com/english/index.html>
13. Сайт Hyundai: <http://www.hyundai-engine.com/>

ЗМІСТ

Передмова	3
1 Створення математичної моделі відокремленого індикаторного циклу ДВЗ	5
1.1 Побудова розрахункової схеми відокремленого індикаторного циклу	7
1.2 Складання комп'ютерної програми (алгоритму) для розрахунку відокремленого індикаторного циклу ДВЗ	15
1.3 Результати розрахункового дослідження за допомогою моделі індикаторного циклу («Індикаторний цикл»)	23
Питання до розділу 1	51
2 Використання математичної моделі “індикаторний цикл” для проведення науково-дослідних робіт	52
2.1. Мета створення математичної моделі “Індикаторний цикл”	52
2.2. Проведення науково-дослідних робіт по визначенню оптимальних параметрів робочого тіла, а також оптимальних показників по умовам експлуатації	54
Питання до розділу 2	72
3 Розробка розрахункової схеми та створення математичної моделі руху механічно вільного клапана в системі керування газообміном двотактного двигуна	73
3.1 Шляхи розвитку систем газообміну	73
3.2 Складання розрахункової схеми руху вільного клапана, яка буде покладена в основу створення математичної моделі	76
3.3 Складання комп'ютерної програми руху випускного клапану	79
3.4 Результати розрахункового дослідження за допомогою моделі руху механічно вільного клапану	81
Питання до розділу 3	82
4 Побудова розрахункової схеми процесу мінімізації питомої поверхні охолодження циліндра для складання математичної моделі	83
Питання до розділу 4	89
5 Результати розрахункового дослідження залежності індикаторного ККД циклу від розмірів циліндра ($D_{ц}$, S)	90
Питання до розділу 5	93

6	Складання креслень окремих вузлів або деталей за результатами комп'ютерного моделювання	94
6.1	Програмні продукти сьогодення, що пропонують комплексні рішення у галузі сучасного автоматизованого конструювання, аналізу і виготовлення елементів ДВЗ.	94
6.2	Приклади побудови тривимірних моделей деталей двигунів на базі прийнятих конструктивних рішень за допомогою програмного пакету AutoCAD.	103
	Питання до розділу 6.	129
7	Рекомендації для самостійної роботи	130
7.1	Мета самостійної роботи	130
	Рекомендована література	133

Навчальне видання

НАЛИВАЙКО Василь Степанович
ТКАЧЕНКО Станіслав Григорович
ХОМЕНКО Вікторія Станіславівна
АВДІЮНІН Роман Юрійович

ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДВЗ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для поглибленого вивчення курсу та отримання
практичних навичок при створенні математичних моделей
процесів ДВЗ та конструкції окремих вузлів і деталей для студентів
спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»
(спеціалізація «Двигуни внутрішнього згоряння»)

Комп'ютерне складання та верстання В. В. Торубара
Коректор О. С. Торубара

Формат 60×84^{1/16}. Умов. друк. арк. 11,2. Тираж 300 пр. Зам. № 34/16

Видавець та виготовлювач Торубара В. В.
вул. Наваринська, 5–17, м. Миколаїв, 54001, тел.: (067) 800-70-70
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4626 від 9.10.2013