

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Транспортний факультет
Кафедра «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки»

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

на тему Дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового

двигуна швидкісного мотоцикла

(Research into the influence of ram-air intake on the performance of a high-speed motorcycle's gasoline engine)

Виконав: студент(ка) 2(м) курсу, групи T-414м

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма (спеціалізація)

«Двигуни внутрішнього згорання»

ТИМОШЕНКО Владислав Олександрович

Керівник к.т.н., доцент

ЄВСЄЄВА Наталія Олексіївна

Рецензент декан машинобудівного

факультету, к.т.н., доцент

ГЛУШКО Василь Іванович

Запоріжжя

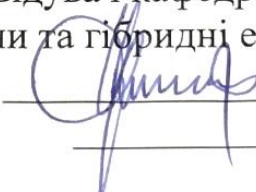
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут, факультет Транспортний факультет
Кафедра Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Освітня програма (спеціалізація) «Двигуни внутрішнього згорання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри «Автомобілі, теплові
двигуни та гібридні енергетичні установки»
 Олександр АРТЮХ
2025 року

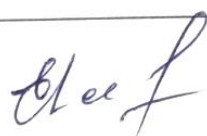
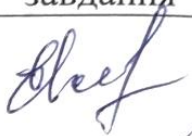


ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ТИМОШЕНКО Владислав Олександрович

1. Тема проекту (роботи) Дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла
керівник проекту (роботи) к.т.н., доцент ЄВСЄЄВА Наталія Олексіївна
затверджені наказом вищого навчального закладу від 26.11.2025 р. № 531
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 12.12.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла на прикладі двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) провести аналіз літератури за темою дослідження; виконати розрахунок системи динамічного наддуву двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R; виконати розрахунок робочого циклу для двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R без та з врахуванням динамічного наддуву, визначити індикаторні та ефективні показники двигуна; за отриманими результатами зробити висновки
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) В презентації до захисту надано основні відомості про роботу, основні формули розрахункової методики, результати досліджень в табличному та графічному вигляді

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада керівника, консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5	Євсєєва Н.О., к.т.н., доцент кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки»		
нормо-контроль	Рябошапка Н.Є., ст. викладач кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки»		

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2025 року.

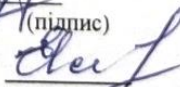
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	05.09.2025	
2	Аналіз літературних джерел. Обґрунтування актуальності дослідження	10.09.2025	
3	Аналіз конструкції системи впуску двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R	20.09.2025	
4	Розробка методики дослідження	25.09.2025	
5	Тепловий розрахунок двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R на номінальному режимі	10.10.2025	
6	Розрахунок величини динамічного наддуву	20.10.2025	
7	Дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна Kawasaki Ninja ZX-10R	10.11.2025	
8	Формування висновків з магістерської роботи	25.11.2025	
9	Оформлення магістерської роботи, нормоконтроль	05.12.2025	
10	Розробка презентації та доповіді до захисту	10.12.2025	
11	Подання роботи до захисту	12.12.2025	

Студент

Керівник проекту (роботи)


(підпис)


(підпис)

ТИМОШЕНКО В.О.

(прізвище та ініціали)

ЄВСЄЄВА Н.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 9 табл., 17 рис., 40 джерел, 2 додатка.

ДИНАМІЧНИЙ НАДДУВ, ДИНАМІЧНИЙ ТИСК, ЕФЕКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ПОВІТРОЗАБІРНИК, ШВИДКІСНИЙ НАДДУВ, ШВИДКІСТЬ, KAWASAKI NINJA ZX10R

Робота присвячена аналізу та оцінці впливу параметрів динамічного (швидкісного) наддуву на індикаторні та ефективні характеристики 4-тактного бензинового двигуна швидкісного мотоцикла. Актуальність дослідження визначається зростаючими вимогами до підвищення ефективності силових установок при одночасному обмеженні їхніх масогабаритних показників, що особливо важливо у сфері мототехніки. Виконано розрахунок динамічного тиску при різних швидкостях руху мотоцикла (від 0 до 350 км/год), а також тепловий розрахунок двигуна з урахуванням наявності або відсутності динамічного наддуву. В результаті дослідження встановлено, що явище динамічного (швидкісного) наддуву позитивно впливає на показники 4-тактного бензинового ДВЗ для швидкісних транспортних засобів. Головним технічним ефектом є збільшення ефективної потужності двигуна: на 100 км/год – на 0,5 %; на 200 км/год – на 1,7 %; на 300 км/год – на 4,2 %. Результати роботи підтверджують, що динамічний наддув може забезпечити відчутне підвищення ефективної потужності без додаткового ускладнення або збільшення маси силового агрегату, що є критично важливим для мототехніки.

Роботу виконано в рамках держбюджетної НДР 01924 «Технічне та фізико-математичне моделювання роботи вузлів та деталей теплових двигунів різного призначення» (2024-2027 р., керівник д.т.н., професор Слинько Г.І.).

За результатами роботи опубліковано тези доповідей на науково-практичній конференції «Тиждень науки 2025».

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Основні показники, що характеризують процеси газообміну при впуску	10
1.2 Конструкція системи впуску ДВЗ	14
1.3 Використання динамічного наддуву для покращення показників ДВЗ	17
1.4 Методики дослідження впливу динамічного наддуву на показники ДВЗ	22
1.5 Висновки за розділом	27
2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
2.1 Опис конструкції та технічна характеристика двигуна мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R	29
2.2 Конструкція системи впуску повітря мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R	32
2.3 Методика дослідження	35
2.4 Висновки за розділом	35
3 РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ ПОВІТРЯ НА ВПУСКУ	36
3.1 Знаходження величини динамічного тиску	36
3.2 Апроксимація квадратичної функції $p_d = f(v)$	37
3.3 Висновки за розділом	42
4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЦИКЛУ ДВИГУНА KAWASAKI NINJA ZX10R НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ БЕЗ ВРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНОГО НАДДУВУ	43
4.1 Вихідні дані до розрахунку	43
4.2 Підготовка даних для теплового розрахунку в програмі Engine	

Calculation	44
4.3 Контроль і аналіз результатів теплового розрахунку	52
4.4 Висновки за розділом	53
5 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЦИКЛУ ДВИГУНА KAWASAKI NINJA ZX10R З ВРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНОГО НАДДУВУ	55
ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	64
ДОДАТОК А	68
ДОДАТОК Б	69

ВСТУП

Використання двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) як джерела енергії для руху автомобільної техніки має свої переваги та недоліки. Переваги – це компактність силового агрегату, висока питома потужність, легкість заправки, відносно великий запас ходу та ін. Недоліки насамперед – екологічна небезпека, пов'язана із згорянням пального та забрудненням продуктами згоряння навколишнього середовища. Автомобіль також є джерелом віброакустичних та електромагнітних хвиль [1]. Існують численні способи подальшого покращення певних показників ДВЗ, проте кожен з них має певні недоліки (складність, вартість, низька надійність). Значно обмежено можливості форсування ДВЗ, які встановлюються на мототехніку – до них, окрім вже традиційних вимог з економічності, надійності, екологічності, вартості, також висувуються доволі жорсткі вимоги щодо масогабаритних показників.

Таким чином, ускладнюється або стає неможливим один з очевидних способів підвищити потужність ДВЗ – застосуванням механічного наддув або газотурбінного наддув. Проте певну ефективність мають системи динамічного (швидкісного або інерційного) наддуву. Їх ефективність обмежена, проте використання на швидкісних мотоциклах не призводить до суттєвого збільшення маси, і такі системи найбільш ефективні при русі транспортного засобу на великих швидкостях [2]. На відміну від «традиційних» систем наддув (з компресором або турбокомпресором) системи динамічного наддув в науковій літературі практично не досліджені, тому тематика дослідження є актуальною.

Тому дана наукова робота направлена на вирішення важливої і актуальної проблеми – дослідження впливу системи динамічного наддуву на показники 4-тактного бензинового двигуна для швидкісного мотоцикла.

Мета і завдання дослідження

Мета даної роботи – дослідити вплив параметрів газообміну на індикаторні та ефективні показники бензинового 4-тактного двигуна з динамічним наддувом на прикладі двигуна мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R.

Для досягнення мети, вирішено ряд **завдань**:

– проведено аналіз літератури за темою дослідження, зокрема визначено основні показники, що характеризують процеси газообміну при впуску; розглянуто основні елементи конструкції системи впуску; розглянуто аспекти щодо використання явища динамічного наддуву для покращення показників ДВЗ; розглянуто існуючі методики дослідження впливу динамічного наддуву на показники ДВЗ;

– обрати бензиновий 4-тактний двигун для дослідження, розглянути його характеристики та особливості конструкції, особливості конструкції системи впуску;

– розроблено методику визначення впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла;

– розрахувати величину динамічного наддув – динамічного тиску повітря – при різних швидкостях руху мотоцикла;

– виконати тепловий розрахунок двигуна при роботі на номінальному режимі, при наявності або відсутності динамічного наддуву, розрахувати індикаторні та ефективні показники двигуна;

– після аналізу отриманих результатів зроблено висновки та рекомендації.

Об’єкт дослідження – процеси газообміну в бензиновому чотиритактному двигуні внутрішнього згорання швидкісного мотоцикла.

Предмет дослідження – вплив параметрів динамічного наддуву на індикаторні та ефективні показники бензинового чотиритактного двигуна внутрішнього згорання, а також на особливості перебігу процесів впуску та газообміну.

Методи дослідження: теоретичні (аналіз, синтез, індукція, дедукція) та практичні (аналітично-розрахунковий метод). Для виконання дослідження використовувались комп'ютерні програми Engine Calculation, Microsoft Office Excel.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

– розроблена методика, яка дозволяє дослідити вплив величини динамічного наддуву на ефективні показники бензинового ДВЗ.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

– розроблена методика, яка дозволяє дослідити вплив величини динамічного наддуву на ефективні показники бензинового ДВЗ, може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих швидкісних транспортних засобів;

– результати роботи (можливі величини тиску динамічного наддуву та їх вплив на індикаторні та ефективні показники ДВЗ) можуть бути впроваджені в навчальний процес НУ «Запорізька політехніка» в якості порівняльних даних;

– результати роботи можуть бути використані також для авіаційних ДВЗ, в тому числі спеціального призначення.

Апробація

Роботу виконано в рамках держбюджетної НДР 01924 «Технічне та фізико-математичне моделювання роботи вузлів та деталей теплових двигунів різного призначення» (2024-2027 р., керівник д.т.н., професор Слинько Г.І.) (акт апробації впровадження результатів роботи в навчальний процес від 25 листопада 2024 р.).

За результатами роботи опубліковано тези доповідей на науково-практичній конференції «Тиждень науки 2025».

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні тенденції покращення ДВЗ, що формувались в останні десятиліття, направлені на підвищення паливної і масляної економічності, надійності, екологічної чистоти викидів, підвищення ступеня автоматизації, діагностування, зменшення масогабаритних показників – ці параметри, в основному визначають рівень досконалості та конкурентності об'єктів експлуатації (автомобілів, мототехніки, судів, тепловозів, генераторів тощо) і раціональне використання найважливіших експлуатаційних матеріалів (масло, паливо, метали та ін.), а також витрати на обслуговування й ремонт об'єктів застосування [3–6].

Способів покращити працники роботи двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) досить багато і реалізувати їх можна удосконалюючи роботу різних систем. За відсутності агрегатів наддуву (компресор, турбокомпресор) двигун внутрішнього згорання називають атмосферним, і одним із способів збільшити кількість повітря на впуску є використання динамічного (швидкісного) наддуву.

1.1 Основні показники, що характеризують процеси газообміну при впуску

У двигунах внутрішнього згорання з якісним регулюванням потужності на такті впуску в надпоршневій порожнині знаходиться суміш повітря і продуктів згорання, що залишилися від попереднього циклу (залишкові гази). Кількість повітря у циліндрі в процесі такту впуску зростає, маса залишкових газів зберігається практично незмінною. Відношення маси залишкових газів у циліндрі M_{γ} до маси повітря (свіжого заряду) $M_{\text{св.зар}}$, що надійшло в циліндр до

кінця такту впуску, називається коефіцієнтом залишкових газів [7]:

$$\gamma = M_{\gamma} / M_{\text{св.зар.}} \quad (1.1)$$

Значення коефіцієнта залишкових газів [8]:

- у 4-тактних бензинових ДВЗ $\gamma = 0,05 \dots 0,16$;
- у 2-тактних бензинових ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою $\gamma = 0,2 \dots 0,4$,
- у 2-тактних бензинових ДВЗ з прямоточною клапанно-щільовою продувкою $\gamma = 0,02 \dots 0,06$.
- у дизелів $\gamma = 0,03 \dots 0,06$;
- у 2-тактних дизелів з продувочним компресором $\gamma = 0,05 \dots 0,25$.

На такті стиску маса і склад суміші газів у циліндрі двигуна практично постійні (в технічно справному двигуні втрати газу через поршневі кільця незначні). При зміні циклової подачі (навантаження), швидкісного режиму (частоти обертання колінчатого вала) склад суміші і маса суміші газів у циліндрі трохи змінюються внаслідок зміни умов масообміну на тактах випуску і впуску [7].

На ділянці процесу згоряння склад і кількість молів робочого тіла внаслідок реакцій окиснювання вуглеводнів помітно змінюються. Склад робочого тіла після закінчення реакцій окиснювання (продуктів згоряння) залежить від співвідношення кількості повітря, що надійшло у циліндр, кількості палива, поданого до циліндра, і повноти реакцій окиснювання [7].

Співвідношення між кількістю повітря, яке надійшло у циліндр, і кількістю поданого палива звичайно характеризується масою повітря, що припадає на 1 кг палива, або коефіцієнтом надлишку повітря. Коефіцієнт надлишку повітря – відношення маси повітря, яке надійшло у циліндр до кінця такту впуску, до маси повітря, що теоретично необхідна для повного згоряння палива, поданого у циліндр [7]:

$$\alpha = M_{\text{св.зар}} / (M_o \cdot V_{\text{ц}}), \quad (1.2)$$

де $V_{\text{ц}}$ – циклова подача палива, кг/цикл.

Коефіцієнт надлишку повітря у двигунах з якісним регулюванням потужності залежно від навантаження змінюється в межах $\alpha = 1,2 \dots 6$. В двигунах внутрішнього згоряння із зовнішнім сумішоутворенням коефіцієнт надлишку повітря залежно від режиму роботи змінюється в межах $\alpha = 0,7 \dots 1,3$ [7].

На номінальному режимі [8]:

– для дизельних ДВЗ $\alpha = 1,2 \dots 2,0$; причому більші значення характерні для ДВЗ з високим ступенем наддуву; для великих судових дизелів $\alpha = 1,5 \dots 2,7$
 – для бензинових $\alpha = 0,85 \dots 1,0$, причому менші значення характерні для карбюраторних двигунів, а більші – для ДВЗ з розподіленим або безпосереднім впорскуванням палива.

Ступінь заповнення циліндра свіжим зарядом у двигунах з наддувом характеризується коефіцієнтом наповнення при умовах на впуску, який являє собою відношення маси свіжого заряду в циліндрі до потенційного заряду робочої порожнини при умовах на впуску [7]:

$$\eta_v = \frac{M_a / (1 + \gamma)}{M_{\text{hs}}} = \frac{M_{\text{св.зар}}}{M_{\text{hs}}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_a}{p_{\text{s сер}}} \cdot \frac{T_{\text{s сер}}}{T_a} \cdot \frac{1}{1 + \gamma}, \quad (1.3)$$

де M_a – маса робочого тіла в надпоршневій порожнині в НМТ, кг;

M_{hs} – потенційний заряд робочої порожнини, кг;

$p_{\text{s сер}}$, $T_{\text{s сер}}$ – середнє за цикл значення тиску і температури повітря або паливоповітряної суміші перед впускними клапанами.

Коефіцієнт наповнення також залежить і параметрів повітря на впуску, від ступеня досконалості впускних каналів і повітроочисника. У карбюраторних двигунах коефіцієнти наповнення й остаточних газів залежать від навантаження (кількісне регулювання потужності) і змінюються в межах:

$\eta_v = 0,1 \dots 0,9$; $\gamma = 0,10 \dots 0,80$. У дизелях $\eta_v = 0,8 \dots 0,9$; $\gamma < 0,04$ і слабо залежать від навантаження [7].

Для номінального режиму роботи ДВЗ можна орієнтуватись на наступні значення коефіцієнта наповнення [8, 9]:

– для бензинових 4-тактних двигунів $\eta_v = 0,7 \dots 0,9$ (менші значення притаманні карбюраторним двигунам, більші – для ДВЗ із впорскуванням палива);

– для бензинових 2-тактних двигунів $\eta_v = 0,4 \dots 0,5$;

– для дизелів без наддуву $\eta_v = 0,80 \dots 0,90$;

– для дизелів з наддувом $\eta_v = 0,80 \dots 0,98$.

Для оцінки повітряних фільтрів системи впуску застосовують різні характеристики: коефіцієнт очищення повітря $K_{оч}$, коефіцієнт пропуску пилу $K_{п}$, припустимий гідравлічний опір фільтра $\Delta P_{пр}$, час роботи фільтра до технічного обслуговування $\tau_{то}$, питома пило місткість Θ , надійність, масогабаритні показники, собівартість конструкції тощо [10].

Припустимий гідравлічний опір, кПа [10]

$$\Delta P_{пр} = P_{Ф\ вх} - P_{Ф\ вих}, \quad (1.4)$$

де $P_{Ф\ вх} - P_{Ф\ вих}$ – відповідно тиск на вході у фільтр та виході з фільтра.

Значення $\Delta P_{пр}$ залежить від конструкції фільтра, типу та призначення двигуна, а збільшення опору вище $\Delta P_{пр}$ призводить до зменшення коефіцієнта наповнення повітря η_v , а відповідно до падіння потужності і зростання питомої витрати палива [11]. Погіршення показників роботи ДВЗ відбувається повільно і майже лінійно до $\Delta P_{пр}$ після чого показники різко погіршуються. Значення $\Delta P_{пр}$ встановлюються стандартами залежно від типу ДВЗ, ступеня його форсування [10]:

– для бензинових ДВЗ $\Delta P_{пр} = 5,0$ кПа;

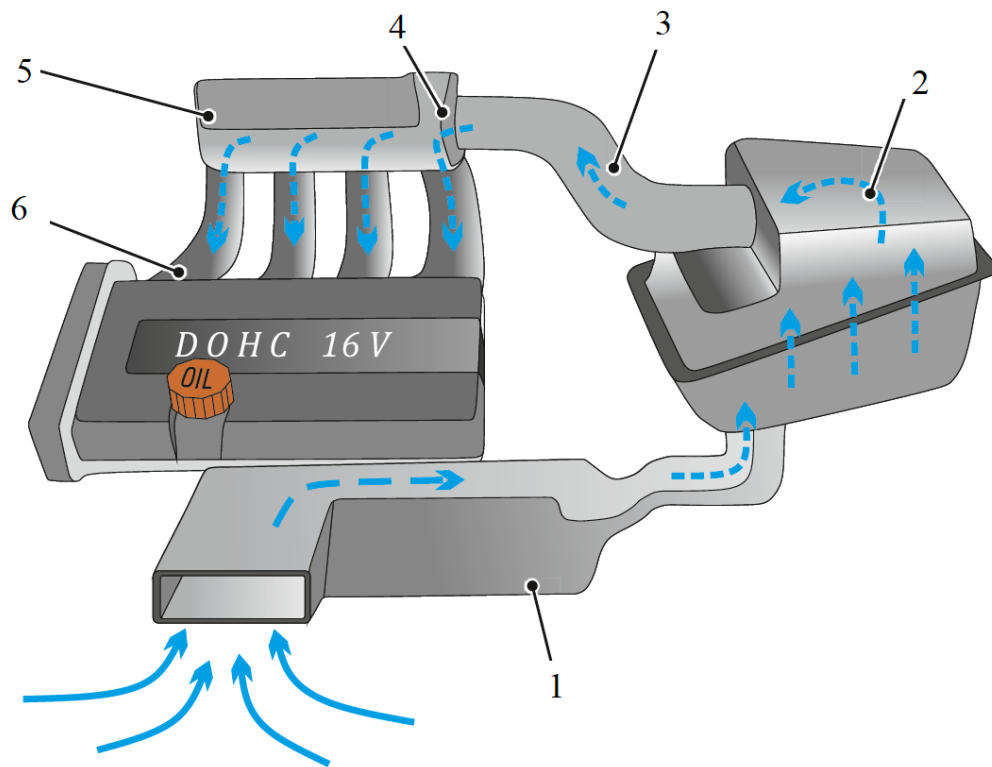
– для дизелів без наддуву $\Delta P_{пр} = 3,5 \dots 4,0$ кПа;

– для дизелів з наддувом $\Delta P_{пр} = 4,5 \dots 5,0$ кПа;

– для тракторних дизелів $\Delta P_{пр} = 7,0$ кПа.

1.2 Конструкція системи впуску ДВЗ

Система впуску (рисунок 1.1) складається з кількох елементів, які забезпечують підведення повітря до впускних каналів головки блока циліндрів. Також на ній лежить функція очищення повітря, яке містить шкідливі тверді частинки (пил, бруд і пісок) [12].



1 – повітрозбірник; 2 – корпус повітряного фільтра з фільтрувальним елементом; 3 – повітропровід; 4 – дросельна заслінка; 5 – ресивер; 6 – впускний колектор

Рисунок 1.1 – Елементи системи впуску [12]

Вся система впуску складається з таких елементів [12]:

– повітрозабірник;

- корпус повітряного фільтра з фільтрувальним елементом;
- повітропровід;
- дросельна заслінка;
- ресивер (за наявності);
- впускний колектор (для багатоциліндрових ДВЗ);
- система проміжного охолодження повітря (якщо автомобіль має систему наддуву).

Повітрозабірник (поз. 1 на рисунку 1.1) – це елемент системи впуску, призначений для забирання повітря із атмосфери або з підкапотного простору. Повітрозабірник розташований найчастіше максимально близько до передньої частини моторного відсіку, зазвичай над радіатором. На позадорожній техніці (позашляховики, військові машини), що експлуатується в жорстких умовах бездоріжжя, які передбачають подолання потічків і річок бродом, повітрозабірник виноситься на певну висоту, вище рівня капота автомобіля. Але незалежно від класу й умов експлуатації автомобіля, повітрозабірник намагаються встановити якнайвище – подалі від дорожнього бруду і пилу [12].

Повітряний фільтр (поз. 2) – це елемент системи впуску, призначений для очищення потоку атмосферного повітря від забруднень і частинок пилу, тим самим уникаючи потрапляння цих небажаних абразивних частинок всередину камери згорання. також, повітряний фільтр знижує рівень шуму від всмоктуваного повітря, а також виступає в ролі полум'ягасника, які виникають при зворотних спалахах паливо повітряної суміші. Більшість сучасних повітряних фільтрів здатні утримувати частинки з поперечним діаметром понад 10...25 мкм.

Повітряний фільтр складається з корпусу і фільтруючого елемента. Корпус зазвичай складається з двох половин, які можуть бути виготовлені зі штампованої сталі або пластику. Фільтруючий елемент зазвичай виготовлений з хімічно обробленого паперу.

Повітроводами (поз. 3) називаються повітряні патрубки, що з'єднують повітрозабірник із корпусом фільтра, а його у свою чергу з корпусом дросельної

заслінки, і насамкінець – корпус дросельної заслінки з ресивером [12–14].

Дросельна заслінка (поз. 4) – пристрій, який регулює кількість повітря, що надходить у циліндри двигуна.. У зібраному вигляді — це корпус у вигляді трубки із встановленою на осі всередині неї заслінкою. За допомогою троса заслінка з'єднана з педаллю акселератора (газу). Ви натискаєте на педаль газу, трос переміщується і повертає заслінку на певний кут. Відповідно, через відкриту заслінку починає надходити більша кількість повітря, електроніка дає команду — і система живлення починає подавати більше пального [12].

Ресивер (поз. 5) призначений для накопичення певної кількості очищеного повітря перед впускним колектором і більш рівномірної його подачі в циліндри [12].

Впускний колектор (поз. 6) є посередником між повітряними патрубками і головкою блока циліндрів. У ДВЗ з розподіленим впорскуванням в патрубки впускного колектора встановлюються паливні форсунки. Іноді, залежно від конструкції, безпосередньо у впускний колектор встановлюється дросельна заслінка [12]. Довжина і діаметр впускного колектора можуть змінюватись в широких межах. Зокрема, чим більше переріз каналів впускного колектора, тим менше величина втрат тиску повітря на впуску, тому на спортивних автомобілях канали мають збільшений діаметр. Велика довжина патрубків впускного колектора дозволяє змістити максимальні значення обертового моменту в сторону низьких швидкостей обертання колінчастого валу [15]. В той же час короткі патрубки дозволяють отримати високу потужність на високих обертах колінчастого валу. Для отримання найкращих умов руху повітря впускній системі, вони можуть бути зі змінною геометрією.

Система додаткового (проміжного) охолодження повітря служить для охолоджувати повітря, стиснутого компресором (в двигунах з наддувом). Робиться це з однією метою – покращити наповнення циліндра за рахунок підвищення щільності повітря шляхом його охолодження. До системи входять патрубки-повітроводи, що з'єднують компресор із дросельною заслінкою, в які послідовно вмонтований теплообмінник (радіатор) із повітряним або рідинним

охолодженням [12].

Також в системі впуску встановлюються компресор (за наявності наддуву), датчик температури повітря, датчик масової витрати повітря (MAF) тощо. Системи впуску і випуску можуть суміщуватись (система рециркуляції відпрацьованих газів EGR).

Загалом, системи впуску повинні забезпечувати [10]:

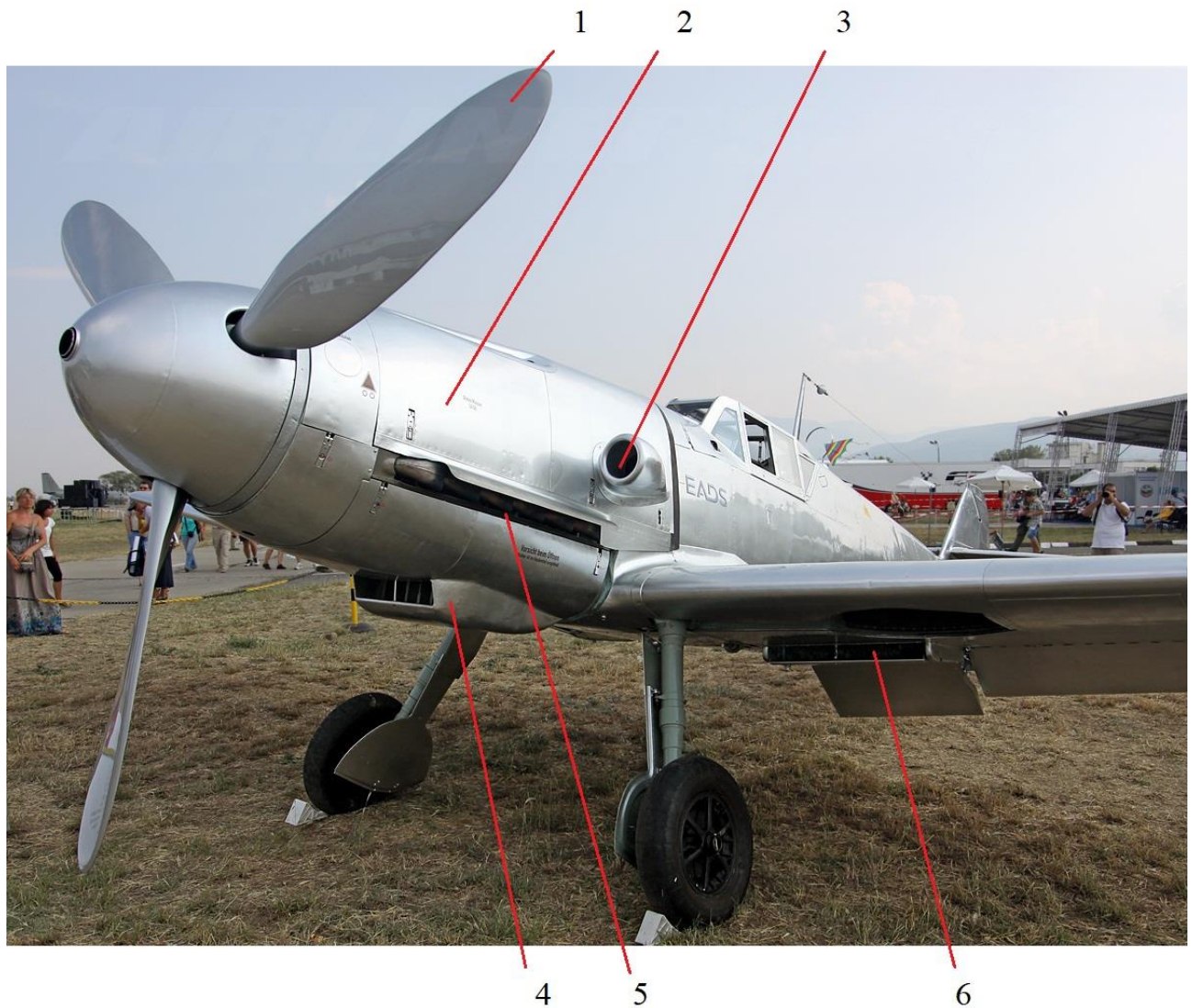
- максимально високе значення коефіцієнта наповнення η_v ;
- оптимальне протікання кривої наповнення у робочому діапазоні частот обертання двигуна (від номінальної до відповідаючої значенню максимального крутного моменту), яка визначає характер зміни крутного моменту двигуна, а відповідно і динамічні якості транспортного засобу;
- оптимальний температурний режим свіжого заряду (при необхідності у бензинових ДВЗ його підігрівання), який відповідатиме найкращому сумішоутворенню при одночасному найбільшому масовому наповненню циліндрів;
- можливість реалізації динамічного наддуву за рахунок вибору необхідних параметрів тракту.

1.3 Використання динамічного наддуву для покращення показників ДВЗ

Системи динамічного (швидкісного або інерційного) наддуву використовувались в авіації, з появою літаків, що досягали значної швидкості (понад 140..160 км/год). За відсутності агрегатів наддуву (компресор, турбокомпресор) використання повітряних забірників, спрямованих по ходу польоту, в деяких межах дозволяє підвищувати потужність двигуна.

На рисунку 1.2 показано швидкісний літак з 12-циліндровим двигуном робочим об'ємом $V_h = 35,7$ л. Обернений в сторону польоту літака

повітрозбірник великого діаметра (поз. 3 на рис. 1.2) дозволяє спрямувати безпосередньо в систему впуску більший потік повітря, ніж якби це повітря забиралось під капотом двигуна.



1 – повітряний гвинт; 2 – верхня бічна кришка капота двигуна; 3 – повітрозабірник; 4 – масляний радіатор; 5 – вихлопні патрубки; 6 – радіатори системи охолодження

Рисунок 1.2 – Літак Hispano HA-1112/Vf-109G-2 [16]

Це дозволяє покращити показники двигуна, проте великий повітрозабірник, що виступає з фюзеляжу, створює додатковий аеродинамічний опір, для подолання якого потрібна додаткова потужність двигуна. Крім того, будучи розташованим відразу за гвинтом, повітрозабірник знижує ККД гвинта.

Тому чим далі повітрозбірник віднесено від гвинта (як на рисунку 1.2 – тим краще.

Загалом, чим більшим буде повітрозбірник, тим більше повітря можна подати до двигуна (позитивний ефект), але, одночасно, погіршується ККД рушія (негативний ефект). Для досягнення ефекту динамічного наддув, окрім власне правильного розташованого повітрозбірника, необхідна правильна конструкція впускних труб, що ведуть до органів газорозподілу. Чим коротші будуть труби системи впуску, прямі, без згинів, тобто з мінімальними опорами по довжині та опорами місцевих втрат, тим краще буде наповнення циліндрів, виражене величиною коефіцієнта наповнення циліндрів η_v .

Крім авіації, системи динамічного наддув використовуються на двигунах автомобілів та мотоциклів – тих, які здатні розганятись до великих швидкостей.

На рисунку 1.3 показано систему впуску карбюраторного двигуна Ford 427. Через два отвори в фальш радіаторній решітці повітря потрапляє до двох повітропроводів, і далі прямує в карбюратор.

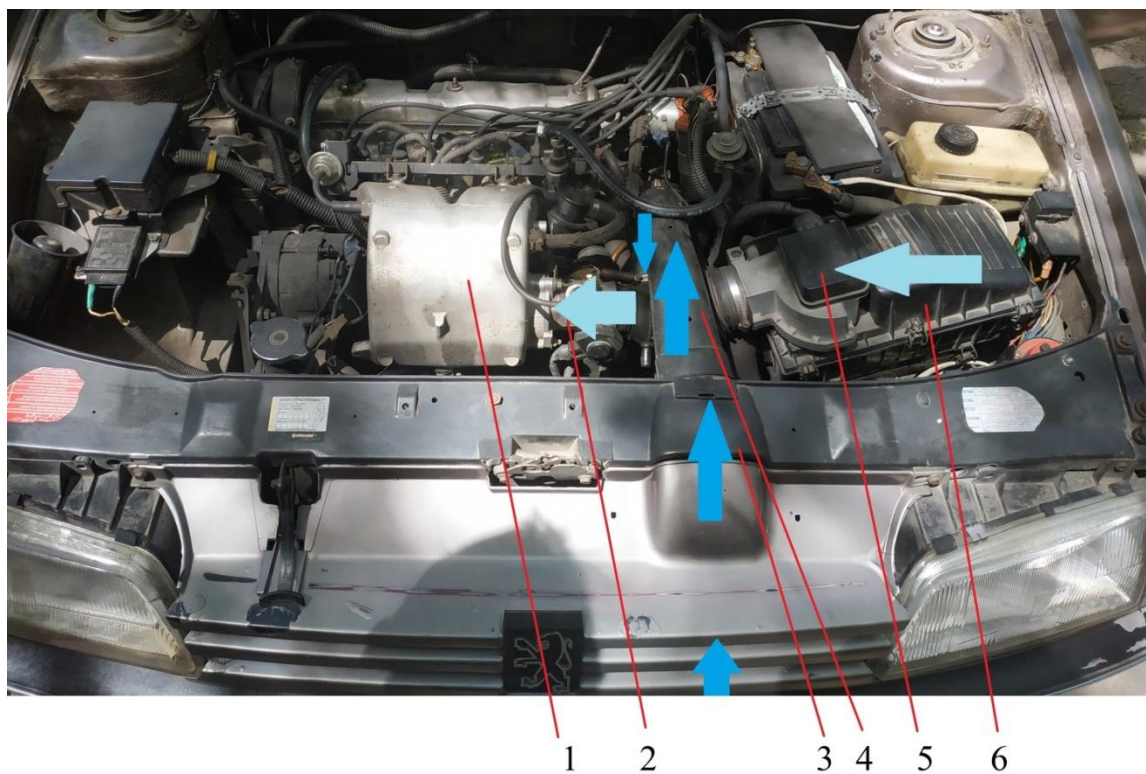
На рисунку 1.4 показано конструкцію впускної системи автомобіля Peugeot 405 з бензиновим атмосферним двигуном. Повітря поступає в систему впуску двома шляхами:

- більша частина – з підкапотного простору і далі через повітряний фільтр;
- менша частина – з атмосфери через всмоктувальний патрубок, інтегрований в фальшрадіаторну решітку.

Згідно інструкції з експлуатації [17], основною функцією повітрозбірника є забір холодного повітря влітку. На зиму трубопровід 4 рекомендується перекривати.



Рисунок 1.3 – Система динамічного наддув, встановлена на двигуні Ford V8 427 автомобіля Ford Fairlane Thunderbolt 1964 року [18]



1 – впускний колектор; 2 – дросельна заслінка; 3 – всмоктувальний патрубок;
4 – трубопровід системи динамічного наддув; 5 – датчик масової витрати
повітря; 6 – корпус повітряного фільтра

Рисунок 1.4 – Система впуску двигуна XU9J1 (DFZ) автомобіля Peugeot 405

На рисунку 1.5 показано конструкцію впускної системи автомобіля Porsche Panamera GTS. При обертах двигуна понад 3500 хв^{-1} відкриваються бічні повітропроводи, і двигун отримує більше повітря. А на високих швидкостях руху завдяки розрахованій формі та перерізу патрубків у впускній системі створюється ефект збільшеного тиску повітря.



Рисунок 1.5 – Система впуску автомобіля Porsche Panamera GTS

Згідно даних з робіт [19, 20], величина тиску на впуску ДВЗ легкових автомобілів збільшується до $3...6 \text{ кПа}$ на швидкостях руху близько до 200 км/год .

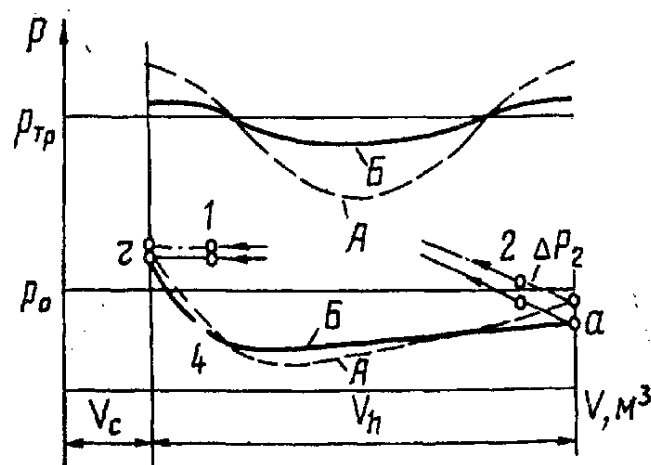
На прикладі автомобілів Porsche Panamera GTS і Peugeot 405 можна стверджувати, що системи динамічного наддуву доволі широко використовуються на легкових автомобілях, однак їх ефективність обмежена великою довжиною і значними поворотами трубопроводів.

Динамічний наддув набув більшого поширення на мотоциклах, починаючи з моделі Kawasaki ZX-11 в 1992 році. Повітрязабірник встановлюється в передній частині корпусу мотоцикла, в обтікальному елементі. З дослідження, проведеному авторами [21], випливає, що на швидкісному мотоциклі приріст тиску в системі впуску при використанні динамічного наддуву складає 4 кПа . Найкращі результати (найбільше

підвищення тиску) отримано при максимальному закругленні повітропроводу, який не має гострих кутів та перегибів. Форма повітропроводу була побудована за допомогою комп'ютерної CAD системи, з врахуванням конструкції мотоцикла.

1.4 Методики дослідження впливу динамічного наддуву на показники ДВЗ

Динамічний наддув ґрунтується на коливальних процесах, які супроводжують впуск свіжого заряджу в циліндр, унаслідок яких створюється хвиля тиску $p_{тр}$ у впускній системі (рисунок 1.6) [22].



А – система з наддувом; Б – система без наддуву; Δp_2 – збільшення тиску в кінці наповнення (дозарядка); $p_{тр}$ – середній тиск у впускному трубопроводі

Рисунок 1.6 – Схема динамічного наддуву [22]

Якщо параметри впускної системи (діаметр і довжину) вибрати такими, щоб у кінці впуску (ділянка а–2) перед впускним клапаном тиск перевищував середнє значення в трубопроводі, здійснюється дозарядка циліндра. Чим вищим буде тиск перед клапаном в точці 2, тим більше в циліндр надійде свіжого

заряду. Якщо параметри випускної системи вибрати такими, щоб наприкінці випуску (ділянка г–4) перед випускним клапаном створилася хвиля розрідження, поліпшиться очищення циліндра від відпрацьованих газів, зменшиться величина γ . Цей вид наддув найбільш економічний, технічно простий і повинен завжди братися до уваги при створенні двигунів [23, 24]. Разом з тим необхідно відмітити й основні його недоліки [22]:

– впускну систему можна налаштувати на резонанс лише на окремих експлуатаційних режимах роботи двигуна (тому найбільш привабливими є складні системи з електронним керуванням її конструктивними параметрами і залежності від режиму роботи двигуна – так звані системи впуску зі змінюваною геометрією);

– налаштування не завжди конструктивно просте і стає.

Газообмін при динамічному наддув і випуску характеризується до зарядкою на впуску і відсмоктуючою дією на випуску, що збільшує масове наповнення циліндра і η_v і зменшує коефіцієнт залишкових газів γ [22].

Вибір та налаштування оптимальних параметрів системи впуску зазвичай виконується практично на готовому зразку двигуна, оскільки наявні моделі не можуть врахувати перебіг всіх фізичних процесів.

В роботах [25, 26] авторами виконано моделювання системи впуску легкового автомобіля в середовищі ANSYS Fluent. Виконано розрахунок параметрів руху повітря, в результаті яких розроблено конструкцію системи впуску, яка забезпечує менші гідравлічні втрати. Використання ефекту динамічного наддуву, сумісно зі збільшенням перерізів повітрозбірника і трубопроводів, використанням альтернативного матеріалу для корпусу повітряного фільтра, забезпечило зменшення падіння тиску на впуску на 96 % (рисунки 1.7, 1.8).

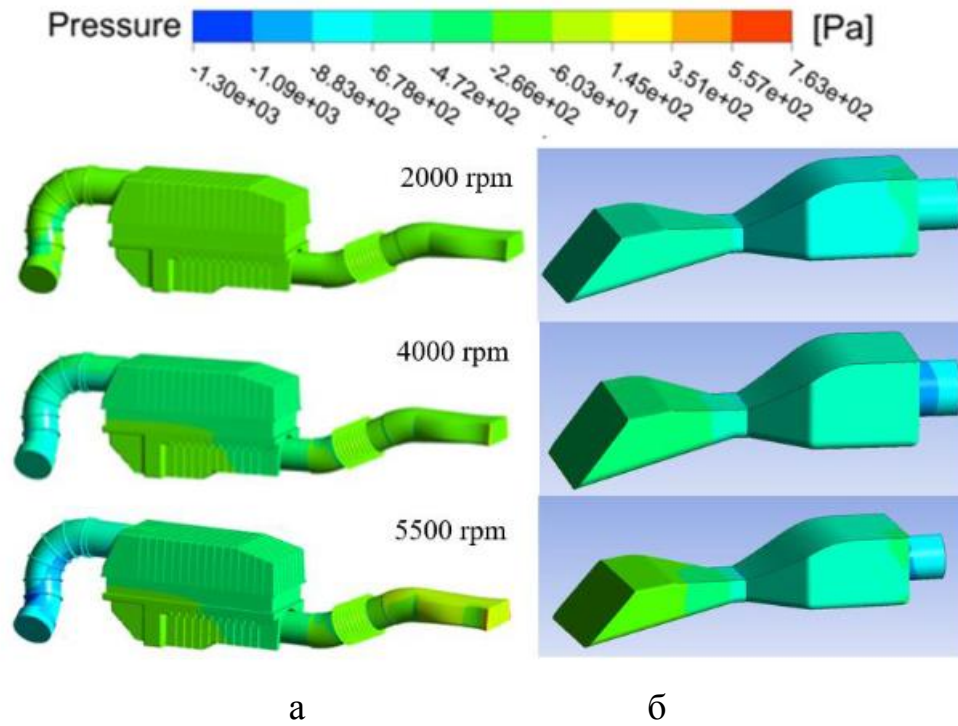


Рисунок 1.7 – Розподіл тиску в системі впуску штатній (а) і покращеній (б) при різних обертах двигуна

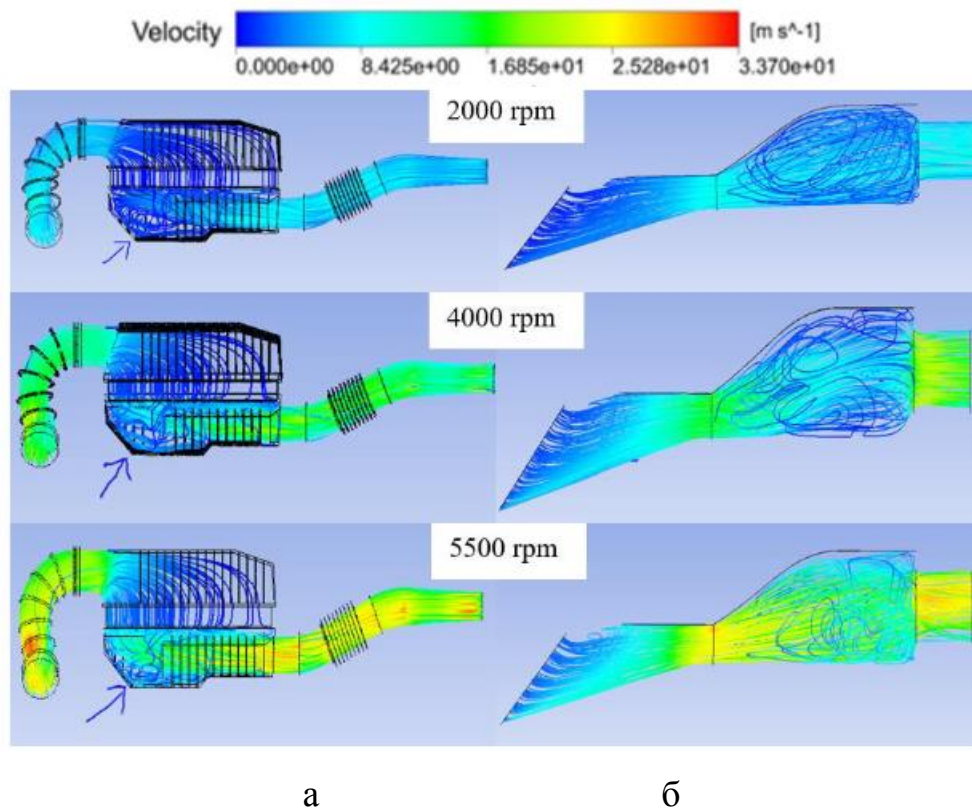


Рисунок 1.8 – Розподіл швидкості повітря в системі впуску штатній (а) і покращеній (б) при різних обертах двигуна

В роботі [27] представлена розрахункова методика, яка дозволяє визначити як використання швидкісного наддуву може підвищити висотність авіаційного двигуна. Повітря для живлення авіаційного двигуна забирається спеціальними всмоктувальними патрубками. Суттєві результати щодо приросту висотності на літаках отримано при швидкостях 400 км/год і більше. При швидкостях 400...600 км/год висотність двигуна збільшується на 600...1200 м понад розрахункової [27].

Використання швидкісного наддуву до розрахункової висоти не викликає збільшення потужності авіаційного двигуна з привідним компресором. Гальмування потоку на вході у всмоктувальний патрубок призводить до збільшення тиску, і відповідно, до підвищення температури впускного повітря до нагнітача. Нагнітачі мають регулятор постійного тиску. Таким чином, тиск на вході в двигун не підвищується, а температура зростає, що призводить до деякого падіння потужності внаслідок погіршення наповнення циліндрів двигуна. Вище границі висотності підвищення тиску на вході у всмоктувальний патрубок дає можливість підвищити висоту, до якої зберігається даний тиск після нагнітача. розташування патрубків на літаку може бути різним, але в усіх випадках вхідний переріз розташовується в зоні, обдуваємій гвинтом. На двигунах повітряного охолодження для вхідних отворів всмоктувальних патрубків є забірники, поміщені на капотах (рисунок 1.9, а). Забірники для повітря, розташовані всередині капоту (рисунок 1.9, б) дають менший лобовий опір, але і дещо менший приріст висотності. При розташуванні вхідного отвору в нагнітачі знизу всмоктувальний патрубок розташовують в обтікачі також знизу капота. Найбільш ефективними є всмоктувальні патрубки, які виступають далі від поверхні літака, але при цьому лобовий опір їх зростає. всмоктувальний патрубок необхідно розташовувати на літаку таким чином, щоб створювався якомога більший приріст висотності, але на подолання лобового опору затратувалась мінімальна потужність [27].

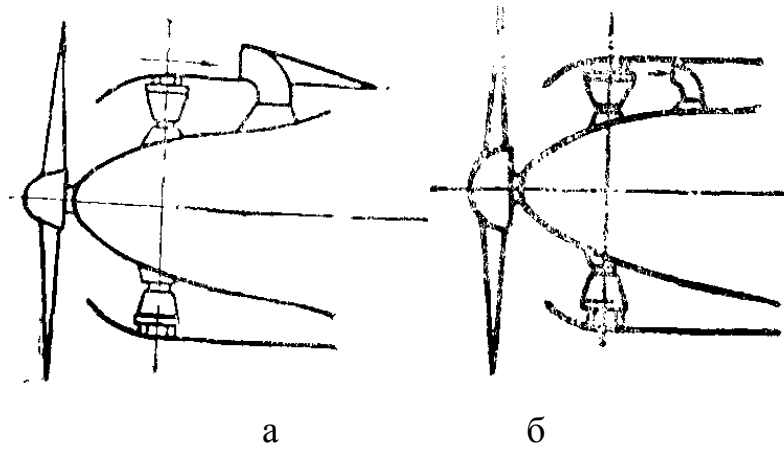


Рисунок 1.9 – Всмоктувальні патрубки з забірником на капоті (а); з забірником в капоті (б) [27]

Якщо літак рухається зі швидкістю V_0 , то швидкісний напір дорівнює $\rho \cdot V_0^2 / 2$, але оскільки патрубок розташовується в зоні, що обдувається гвинтом, а струмінь повітря, відкинутий від гвинта, має швидкість більшу, ніж швидкість польоту, то повний швидкісний напір буде дорівнювати [27]

$$h = \frac{a\rho V_0^2}{2}, \quad (1.5)$$

де $a = 1,05 \dots 1,1$ – для горизонтального польоту, $a = 1,1 \dots 1,2$ для режиму підйому.

Якщо частину напору, який втрачається в патрубку, позначити через ζ , то для підвищення тиску на вході в нагнітач або карбюратор можна використовувати тільки напір [27]

$$h = (1 - \zeta) \frac{a\rho V_0^2}{2}. \quad (1.6)$$

Для виступаючих патрубків без сітки $\zeta \approx 0,15$; при розташуванні вхідного отвору в зоні максимального тиску можна отримати $\zeta \approx 0,08$.

Наближено приріст висотності за рахунок динамічного наддув можна розрахувати за формулою [27]

$$\Delta H = 36 \left(\frac{V_0}{100} \right)^2. \quad (1.7)$$

Таким чином, якщо висотність двигуна була $H_p = 6000$ м, а швидкість польоту $V_0 = 600$ км/год, висотність в умовах польоту [27]

$$H_p + \Delta H = 6000 + 36 \left(\frac{600}{100} \right)^2 = 7296 \text{ м.} \quad (1.8)$$

В залежності від форми і розташування всмоктувального патрубку на подолання його лобового опору використовується певна потужність. на висоті 5000 м при швидкості польоту 500 км/год на опір виступаючого патрубка витрачається 5 % потужності двигуна, а на швидкості 700 км/год – до 10 %. На висотах 10000 м витрата потужності на вказаних швидкостях складає 4...8 км/год відповідно [27].

1.5 Висновки за розділом

Динамічний (швидкісний) наддув – це спосіб підвищення тиску у впускному тракті ДВЗ за рахунок набігаючого потоку повітря. Для його реалізації потрібні:

- власне швидкісний натиск (набігаючий потік)
- правильно спрофільований і розташований повітрозбірник.

Використання динамічного наддуву найбільш ефективно на

атмосферних ДВЗ наземних і літальних транспортних засобів, що рухаються на великих швидкостях (понад 140...200 км/год).

Методик розрахунку впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна мотоцикла немає, тому тема дослідження є актуальною.

Основні показники, що характеризують газообмін в циліндрі та процес впуску: коефіцієнт залишкових газів γ , коефіцієнт надлишку повітря α , коефіцієнт наповнення η_v .

2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ДВИГУНА ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

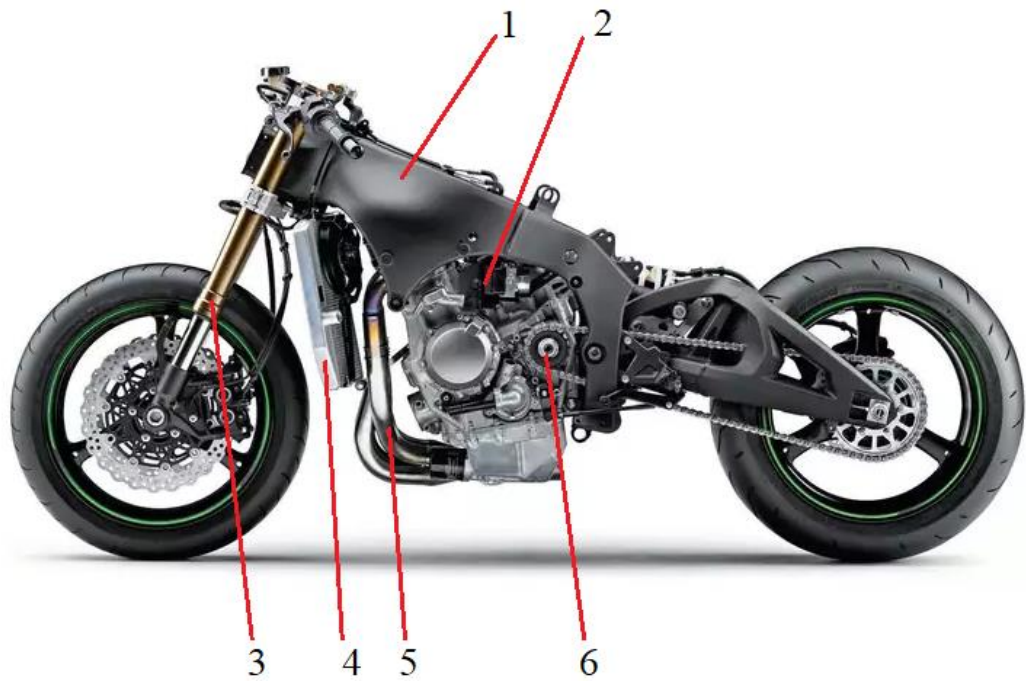
2.1 Опис конструкції та технічна характеристика двигуна мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R

Для дослідження впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна швидкісного мотоцикла обрано двигун мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R, який виготовляється з 2004 року.

Двигун рядний чотирициліндровий з рідинним охолодженням об'ємом 998 куб. см, розташованого поперек рами мотоцикла (рисунок 2.1, 2.2). Вісь колінчастого вала, вхідний вал та вихідний вал двигуна Ninja ZX-10R розташовані у трикутній формі, щоб зменшити довжину двигуна, тоді як генератор розміщений за рядом циліндрів, щоб зменшити ширину двигуна. Система газорозподілу типу DOHC, з 4 клапанами на кожен циліндр. Розподільні вали виготовлені з хромомолібденової сталі. Система охолодження рідинного типу, також є теплообмінник для охолодження моторної оливи, розташований поруч з масляним фільтром. Поршні ковани [28]. Система випуску відпрацьованих газів зменшеного опору. Система впуску свіжого повітря зменшеного опору, з реалізацією динамічного наддуву. Фільтруючий елемент – віскозний паперовий. Система мащення з сухим картером [29].

Технічні характеристики двигуна мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R [29, 30, 31]:

- кількість циліндрів – 4;
- кількість клапанів на циліндр – 4;
- робочий об'єм – 998 см³;
- хід поршня – 76,0 мм;
- діаметр циліндра – 55,0 мм;
- тип паливоподачі – інжекторний, 4 дросельні заслонки Mikuni 47EIDW;
- паливні форсунки – EAT803, 12 отворів, опір 11,7...12,3 Ом при 20 °С;



1 – рама; 2 – двигун; 3 – передня вилка; 4 – радіатор системи охолодження; 5 – вихлопна труба; 6 – привідна зірочка

Рисунок 2.1 – Двигун мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R [32]



Рисунок 2.2 – Двигун мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R [28]

- система запуску – електричним стартером;
- система охолодження – рідинна;
- ступінь стиснення – 13;
- максимальна ефективна потужність двигуна – 146 кВт (197 к.с.) при 13000 хв⁻¹;
- максимальна ефективна потужність на задньому колесі – 124,5 кВт (167 к.с.) при 11020 хв⁻¹;
- максимальний обертальний момент двигуна – 113,5 Н·м при 11500 хв⁻¹;
- максимальний обертальний момент на задньому колесі – 103,5 Н·м при 11200 хв⁻¹;
- частота обертання холостого ходу – 1100±50 хв⁻¹;
- фази газорозподілу впускних клапанів – відкриття 45 ° до ВМТ, закриття 76° після НМТ, тривалість відкриття 301 °;
- фази газорозподілу випускних клапанів – відкриття 77 ° після НМТ, закриття 49° перед ВМТ, тривалість відкриття 306 °;
- зазор впускних клапанів ГРМ – 0,17...0,22 мм;
- зазор випускних клапанів ГРМ – 0,15...0,22 мм;
- система керування двигуном – електронна з цифровою пам'яттю Mitsubishi;
- система запалювання – з акумуляторною батареєю, котушками, з електронним керуванням кута випередження запалювання мікроконтролером (ТСВІ);
- кут випередження запалювання – від 10° до ВМТ при 1100 хв⁻¹ до 42,5 ° до ВМТ при 10500 хв⁻¹;
- свічки запалювання – іридієва NGK SILMAR9B9;
- зазор між електродами свічки запалювання – 0,8...0,9 мм;
- електрична система – 12 В;
- акумуляторна батарея 12 В 8,6 А·год (10HR);
- генератор – трифазний змінного струму, максимальна продуктивність

14 В 30А при 5000 хв⁻¹;

- вакуум в дросельному вузлі на холостих обертах – 29,3±1,3 кПа;
- нумерація циліндрів – зліва направо 1–2–3–4;
- порядок роботи циліндрів – 1–2–4–3;
- моторна олива – SAE 10W-40, API SG, SH, SJ, SL or SM with JASO

MA, MA1 або MA2;

- об'єм моторної оливи (для повністю сухого двигуна) – 3,7 л;
- об'єм моторної оливи (при заміні оливи) – 2,9...3,3 л;
- об'єм системи охолодження – 2,6 л;
- паливо – бензин з октановим числом не менше 90 (моторний метод),

95 (дослідницький метод);

- тиск палива в рампі форсунок – 2,94 МПа;
- подача палива паливним насосом – 1,34 л/хв;
- паливний насос – занурювального типу в баку.

2.2 Конструкція системи впуску повітря мотоцикла Kawasaki Ninja ZX-10R

Забір атмосферного повітря здійснюється ззовні через всмоктувальний патрубок (рисунок 2.3), який встановлено в передній частині мотоцикла в обтікачі (рисунок 2.4). Патрубок захищений сіточкою для уникнення потрапляння великого сміття.

Далі горизонтальний потік повітря відхиляється під кутом вгору, обходить верхню частину двигуна, закручується вниз, в напрямку повітряного фільтра і дросельних заслінок (рисунок 2.5).

За рахунок великого перерізу повітропроводів, орієнтації повітрозбірника по напрямку руху мотоцикла, на великих швидкостях руху мотоцикла досягається збільшення тиску повітря на впуску за рахунок

динамічного (швидкісного) наддуву. Максимальна швидкість мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R, в залежності від модифікації, може сягати 304 км/год.



Рисунок 2.3 – Всмоктувальний патрубок системи динамічного наддуву мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R, вид спереду (а), вид ззаду (б) [33]

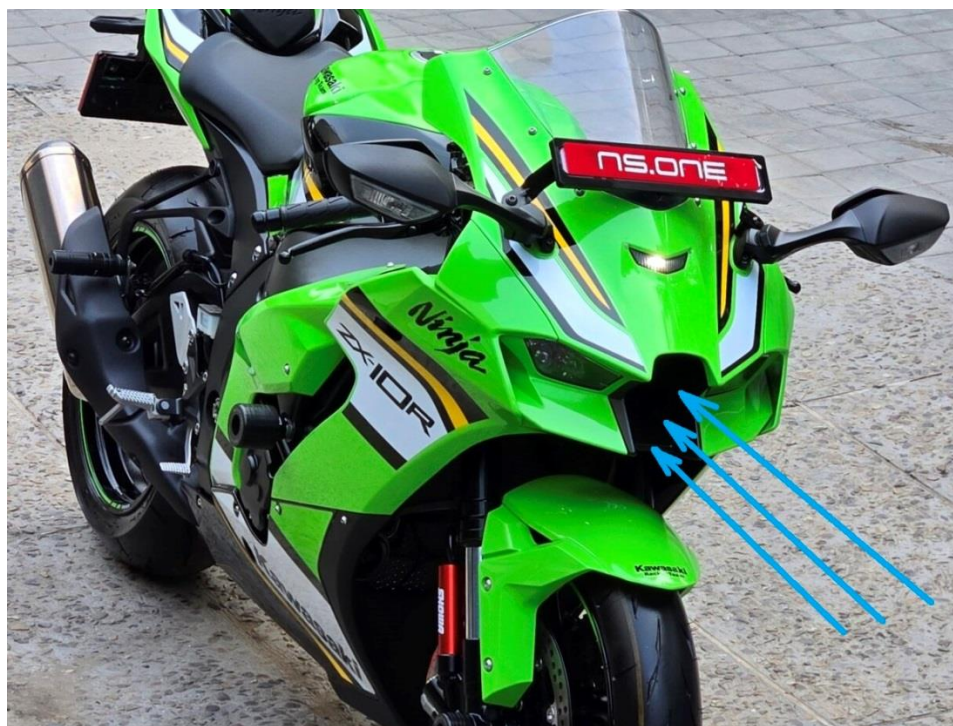


Рисунок 2.4 – Забір повітря двигуном мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R [28]



1 – повітрязбірник; 2 – трубопровід; 3 – дросельні заслінки

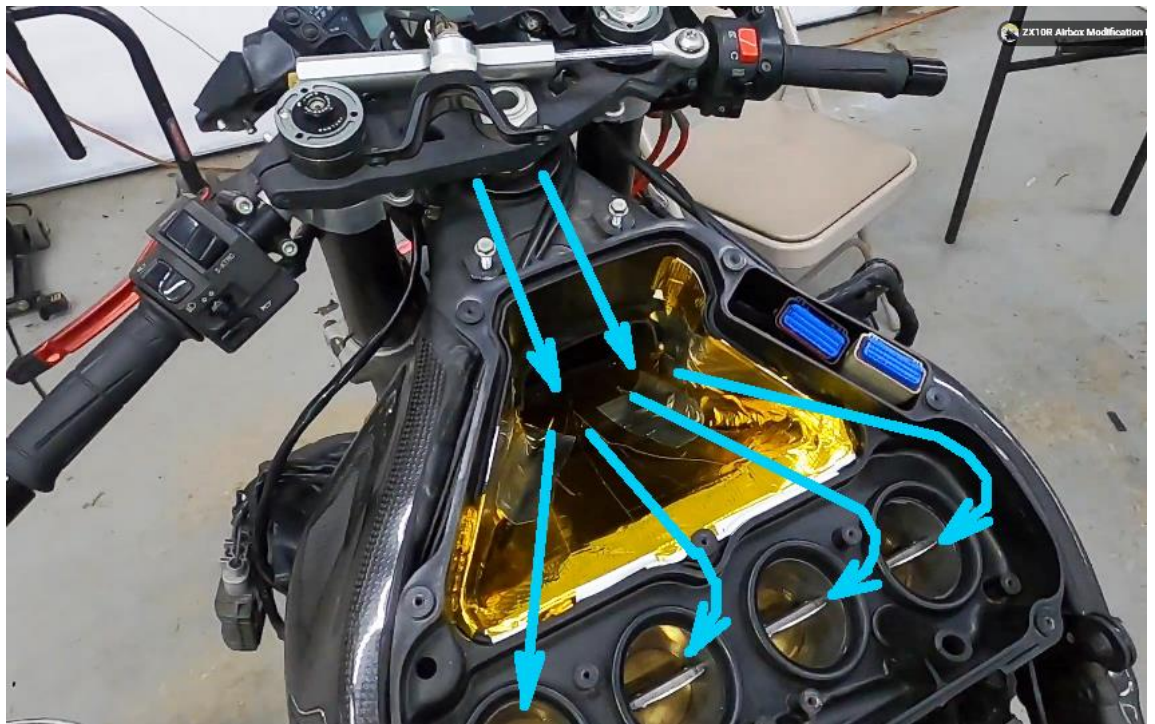


Рисунок 2.5 – Схема впускної системи та руху повітря в мотоциклі Kawasaki Ninja ZX10R (повітряний фільтр не показано) [32]

2.3 Методика дослідження

Методика визначення впливу динамічного наддуву на показники бензинового ДВЗ швидкісного мотоцикла полягає в наступному:

- розрахувати величину динамічного наддуву шляхом знаходження динамічного тиску повітря при можливих швидкостях руху мотоцикла від 0 до 350 км/год;

- побудувати графік залежності динамічного тиску повітря p_d від швидкості руху транспортного засобу v та апроксимацією знайти квадратичне рівняння, яке описує дану функцію;

- виконати тепловий розрахунок двигуна при роботі на номінальному режимі в комп'ютерній програмі Engine Calculation, згідно методики та рекомендацій [8, 34–36] при відсутності динамічного наддуву, а також при його наявності, при швидкості руху мотоцикла 100 км/год, 200 км/год, 300 км/год; розрахувати індикаторні та ефективні показники двигуна;

- після аналізу отриманих результатів зробити висновки та рекомендації щодо ефективності та доцільності використання динамічного наддуву на наземних та літаючих транспортних засобах.

2.4 Висновки за розділом

Розроблена методика дозволяє дослідити вплив динамічного наддуву на показники 4-тактного бензинового двигуна швидкісного мотоцикла на прикладі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R.

3 РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ ПОВІТРЯ НА ВПУСКУ

3.1 Знаходження величини динамічного тиску

Динамічний тиск повітря – це тиск, створюваний швидкістю його руху. Динамічний тиск є частиною повного тиску і являє собою кінетичну енергію потоку, що рухається, розраховується за формулою, Па

$$p_d = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2, \quad (3.1)$$

де v – швидкість повітря в перерізі повітроводу, м/с.

ρ – щільність повітря, кг/м³

$$\rho = \frac{p_k}{RT_k}. \quad (3.2)$$

Знаходимо ρ при нормальних температурі і тиску $p_0 = 101325$ Па, $T_0 = 293,15$ К (згідно NIST)

$$\rho = \frac{p_k}{RT_k} = \frac{101325}{287 \cdot 293,15} = 1,2043 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (3.3)$$

Виконуємо розрахунок величини динамічного тиску при русі транспортного засобу від $v = 0$ до $v = 350$ км/год.

Виконуємо розрахунок динамічного тиску для швидкості $v = 300$ км/год
= 83,33 м/с

$$p_d = 0,5 \cdot 1,2043 \cdot 83,33^2 = 4181,597 \text{ Па.}$$

Аналогічно розраховуємо інші значення динамічного тиску, будуюмо діаграму (рисунок 3.1).

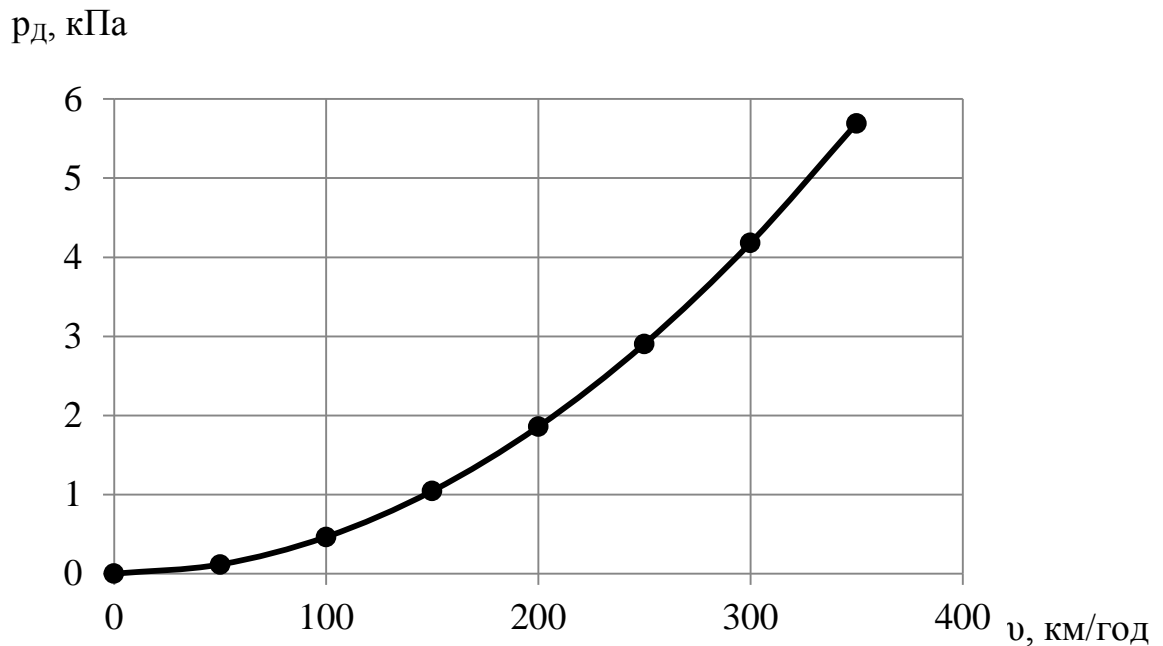


Рисунок 3.1 – Величина зміни динамічного тиску повітря p_d від швидкості руху транспортного засобу v при нормальних температурі і тиску

3.2 Апроксимація квадратичної функції $p_d = f(v)$

З огляду на характер графіку динамічного тиску повітря p_d від швидкості руху транспортного засобу v (рисунок 3.1), виконуємо апроксимацію знаходженням квадратичної регресії за методиками [37–39]. Складаємо таблицю початкових даних, в якій присвоюємо значення v (км/год) = x_i , p_d (кПа) = y_i (таблиця 3.1).

Складаємо таблицю допоміжних величин (таблиця 3.2).

Таблиця 3.1 – Таблиця початкових даних

i	x_i	y_i
1	0	0
2	50	0,1162
3	100	0,4646
4	150	1,0454
5	200	1,8585
6	250	2,9039
7	300	4,1816
8	350	5,6916

Таблиця 3.2 – Таблиця допоміжних величин для знаходження квадратичної функції $p_d = f(v)$

i	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i \cdot y_i$	$x_i^2 \cdot y_i$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	50	0,1162	2500	125000	6250000	5,81	290,5
3	100	0,4646	10000	1000000	100000000	46,46	4646
4	150	1,0454	22500	3375000	506250000	156,81	23521,5
5	200	1,8585	40000	8000000	1600000000	371,7	74340
6	250	2,9039	62500	15625000	3906250000	725,98	181493,75
7	300	4,1816	90000	27000000	8100000000	1254,5	376344
8	350	5,6916	122500	42875000	15006250000	1992,1	697221
Σ	1400	16,262	350000	98000000	29225000000	4553,3	1357856,75

Знаходимо коефіцієнти a , b , c рівняння квадратичної регресії $\hat{y} = ax^2 + bx + c$ з системи рівнянь:

$$\begin{cases} a\sum x_i^2 + b\sum x_i + nc = \sum y_i, \\ a\sum x_i^3 + b\sum x_i^2 + c\sum x_i + = \sum x_i y_i, \\ a\sum x_i^4 + b\sum x_i^3 + c\sum x_i^2 + = \sum x_i^2 y_i. \end{cases} \quad (3.4)$$

Після підстановки отримуємо:

$$\begin{cases} 350000a + 1400b + 8c = 16,262, \\ 98000000a + 350000b + 1400c = 4553,3, \\ 29225000000a + 98000000b + 350000c = 1357856,75 \end{cases}$$

Вирішуємо цю систему лінійних рівнянь методом Крамера.

Спочатку складаємо матриці та знаходимо їх визначники

$$\Delta = \begin{vmatrix} 350000 & 1400 & 8 \\ 98000000 & 350000 & 1400 \\ 29225000000 & 98000000 & 350000 \end{vmatrix} = 350000 \cdot 350000 \cdot 350000 +$$

$$+ 1400 \cdot 1400 \cdot 29225000000 + 8 \cdot 98000000 \cdot 98000000 - 8 \cdot 350000 \cdot 29225000000 -$$

$$- 350000 \cdot 1400 \cdot 98000000 - 1400 \cdot 98000000 \cdot 350000 = 42875000000000000 +$$

$$+ 572810000000000000 + 768320000000000000 - 818300000000000000 -$$

$$- 4802000000000000000 - 4802000000000000000 = -8820000000000000;$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} 16.262 & 1400 & 8 \\ 4553.3 & 350000 & 1400 \\ 1357856.75 & 98000000 & 63300,6166 \end{vmatrix} = -40980870000;$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} 350000 & 16.262 & 8 \\ 98000000 & 4553.3 & 1400 \\ 29225000000 & 1357856.75 & 350000 \end{vmatrix} = 724500000;$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} 350000 & 1400 & 16.262 \\ 98000000 & 350000 & 4553.3 \\ 29225000000 & 98000000 & 1357856.75 \end{vmatrix} = -99225000000.$$

Далі знаходимо

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{-40980870000}{-882000000000000} = 46,464 \cdot 10^{-6};$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{724500000}{-882000000000000} = -0,8214 \cdot 10^{-6};$$

$$c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{-99225000000}{-882000000000000} = 112,5 \cdot 10^{-6}.$$

Тоді шукане рівняння квадратичної регресії отримає вигляд

$$\hat{y} = 46,464 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,8214 \cdot 10^{-6} \cdot x + 112,5 \cdot 10^{-6}. \quad (3.5)$$

Тобто функція $p_D = f(v)$ набуває вигляду

$$p_D = 46,464 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 - 0,8214 \cdot 10^{-6} \cdot v + 112,5 \cdot 10^{-6}.$$

Для оцінки значимості параметрів регресії і кореляції:

– знаходимо середнє значення y :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{16,262}{8} = 2,03275. \quad (3.6)$$

– складаємо таблицю допоміжних величин (таблиця 3.3).

Знаходимо індекс кореляції

$$R = \sqrt{1 - \frac{1,399 \cdot 10^{-6}}{2,45382 \cdot 10^{-5}}} = 0,9711.$$

Таблиця 3.3 – Таблиця допоміжних величин

i	x_i	y_i	\hat{y}_i	$y_i - \bar{y}$	ε_i	ε_i^2	A_i	$\Delta\varepsilon_i$	$(\Delta\varepsilon_i)^2$
1	0	0	0,0001125	0,0001125	-0,000113	$1,26563 \cdot 10^{-8}$	—	—	—
2	50	0,1162	0,1158525	-0,0003475	0,000347	$1,20756 \cdot 10^{-7}$	0,002990534	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
3	100	0,4646	0,4638925	-0,0007075	0,000707	$5,00556 \cdot 10^{-7}$	0,001522815	0,0004	$1,296 \cdot 10^{-7}$
4	150	1,0454	1,0442325	-0,0011675	0,001168	$1,36306 \cdot 10^{-6}$	0,001116797	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
5	200	1,8585	1,8568725	-0,0016275	0,001628	$2,64876 \cdot 10^{-6}$	0,000875706	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
6	250	2,9039	2,9018125	-0,0020875	0,002088	$4,35766 \cdot 10^{-6}$	0,000718861	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
7	300	4,1816	4,1790525	-0,0025475	0,002548	$6,48976 \cdot 10^{-6}$	0,000609217	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
8	350	5,6916	5,6885925	-0,0030075	0,003007	$9,04506 \cdot 10^{-6}$	0,00052841	0,0005	$2,116 \cdot 10^{-7}$
Σ	—	—	—	—	—	$2,45382 \cdot 10^{-5}$	0,00836	—	$1,399 \cdot 10^{-6}$

Знаходимо індекс детермінації:

$$R^2 = 0,971^2 = 0,9430.$$

Знаходимо середню похибку апроксимації

$$\bar{A} = \frac{0,00836}{8} \cdot 100\% = 0,1045 \%$$

3.3 Висновки за розділом

Визначено характер залежності зростання величина тиску динамічного (швидкісного) наддуву при зростанні швидкості руху транспортного засобу $p_d = f(v)$. За отриманими значеннями індекса кореляції $R = 0,971$, індекса детермінації $R^2 = 0,943$, середньої похибки апроксимації $\bar{A} = 0,1045 \%$ можна стверджувати, що отримане квадратичне рівняння (3.4) дозволяє розрахувати величину p_d при будь-якому значенні v в межах від 0 до 350 км/год.

4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЦИКЛУ ДВИГУНА KAWASAKI NINJA ZX10R НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ БЕЗ ВРАХУВАННЯ ДИНАМІЧНОГО НАДДУВУ

Виконано термодинамічний розрахунок робочого циклу 4-тактного бензинового двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі роботи. Розрахунок виконуємо за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation за стандартною методикою [8, 34–36]. В результаті розрахунку отримано параметри стану робочого тіла в циліндрі (p , T , m , V), циклові індикаторні показники двигуна (індикаторна робота L_i ; середній індикаторний тиск p_i ; індикаторний ККД η_i ; питома індикаторна витрата палива g_i). Розраховано ефективні показники двигуна (ефективна потужність N_e ; ефективна питома витрата палива g_e ; середній ефективний тиск p_e ; ефективний ККД η_e), побудовано індикаторні діаграми p – V , T – V .

4.1 Вихідні дані до розрахунку

Згідно до технічних характеристик двигуна Kawasaki Ninja ZX10R (див. розділ 2.1) приймаємо вихідні дані для розрахунку:

- число циліндрів $i = 4$;
- тактність – 4-тактний;
- розташування циліндрів – в ряд;
- потужність $N_e = 146$ кВт;
- частота обертання валу $n = 13000$ хв⁻¹;
- тиск повітря на впуску (атмосферний) $p_o = 101325$ Па;
- температура повітря впуску (атмосферне) $T_o = 295,15$ К;
- ступінь стиснення $\varepsilon = 13$;

- відношення ходу поршня до діаметра циліндра $S/D = 0,724$;
- паливо – бензин.

Інші дані приймаємо згідно даних з розділу 2.1 і паспортних даних двигуна.

4.2 Підготовка даних для теплового розрахунку в програмі Engine Calculation

Теплота згорання палива (бензин) $H_{\text{CT}} = 44,0$ МДж/кг.

Показник процесу згорання $m_1 = 3,5$ – прийнято на основі рекомендацій [8], для бензинових ДВЗ $m_1 = 3,2...4,0$.

Кількість циліндрів $i = 4$.

Розташування циліндрів – в ряд.

Діаметр циліндра $D = 0,076$ м.

Хід поршня $S = 0,055$ м.

Площа поршня – площа плоскої поверхні поршня, перпендикулярної осі циліндра, визначається за формулою [8]

$$F_{\text{п}} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3.14}{4} 0,076^2 = 0,0453 \text{ м}^2, \quad (4.1)$$

Робочий об'єм циліндра

$$V_{\text{h}} = F_{\text{п}} \cdot S = 0,0453 \cdot 0,055 = 0,2496 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, \quad (4.2)$$

Радіус кривошипа

$$r_k = \frac{S}{2} = 0,055 / 2 = 0,0275 \text{ м.} \quad (4.3)$$

Довжина шатуна $L_{ш} = 0,107$ м, тоді відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна

$$\lambda_k = r_k / L_{ш} = 0,0275 / 0,107 = 0,258. \quad (4.4)$$

Площа теплообміну поршня $F_p' > F_p$ і залежить від конфігурації днища [8]. Поршень двигуна Kawasaki Ninja ZX10R має незначні заглиблення, тоді

$$F_p' = 1,1 \cdot F_p = 1,1 \cdot 4,53 \cdot 10^{-3} = 4,99 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.5)$$

Площа теплообміну кришки F_k залежить від конструкції камери стиснення. У бензинових ДВЗ $F_k = (1,1 \dots 1,3) \cdot F_p$ [8]. Тоді

$$F_k = 1,2 \cdot F_p = 1,2 \cdot 4,53 \cdot 10^{-3} = 5,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.6)$$

Об'єм камери стиснення

$$V_c = \frac{\pi}{2} D^2 \cdot r_k \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1}, \quad (4.7)$$

$$V_c = \frac{3,14}{2} 0,076^2 \cdot 0,0275 \cdot \frac{1}{13 - 1} = 20,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тиск і температура на вході до двигуна $T_k = 293,15$ К, $p_k = 101325$ Па.

Кут початку згорання φ_c у бензинових ДВЗ залежить від кута випередження запалювання $\Delta\varphi_{вип}$

$$\varphi_c = 360 - \Delta\varphi_{вип} = 360 - 42,5 = 317,5 \text{ }^\circ \text{ ПКВ,} \quad (4.8)$$

де $\Delta\varphi_{\text{вип}} = 42,5^\circ$ – величина, яка залежить від швидкохідності двигуна, розмірів і типу камери згорання.

Кут кінця згорання пов'язаний з кутовою тривалістю згорання $\Delta\varphi_{\text{зг}}$, яка визначається в залежності від типу двигуна [8]

$$\varphi_z = \varphi_c + \Delta\varphi_{\text{зг}} = 317,5 + 60 = 377,5^\circ \text{ ПКВ}, \quad (4.9)$$

де $\Delta\varphi_{\text{зг}} = 40\dots 60^\circ$ – для бензинових ДВЗ [8]. Оскільки двигун високообертовий, приймаємо $\Delta\varphi_{\text{зг}} = 60^\circ$.

Кутова швидкість обертання кривошипа визначається за частотою обертання колінчатого валу n

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 13000}{60} = 1360,7 \text{ с}^{-1}. \quad (4.10)$$

Коефіцієнт надлишку повітря приймаємо $\alpha = 0,88$.

Цикловий масовий заряд повітря в циліндрі

$$\Delta m_{\text{вц}} = V_h \cdot \rho_k \cdot \eta_v = 0,2494 \cdot 10^{-3} \cdot 1,204 \cdot 0,847 = 254 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл}, \quad (4.11)$$

де ρ_k – щільність заряду на вході в циліндр

$$\rho_k = \frac{p_k}{RT_k} = \frac{101352}{287 \cdot 293,15} = 1,204 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (4.12)$$

η_v – коефіцієнт наповнення

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_k - \Delta p_{\text{вп}}}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \gamma T_r}, \quad (4.13)$$

$$\eta_v = \frac{13}{13-1} \cdot \frac{101325 - 4053}{101325} \cdot \frac{293,15}{293,15 + 4 + 0,07 \cdot 900} = 0,847;$$

$\Delta p_{\text{вп}}$ – втрата тиску на впуску

$$\Delta p_{\text{вп}} = (0,04 \dots 0,15) \cdot p_k = 0,04 \cdot 101325 = 4053,0 \text{ Па}; \quad (4.14)$$

$\Delta T = 4 \text{ К}$ – підігрів заряду на впуску для бензинових ДВЗ;

$\gamma = 0,07$ – коефіцієнт залишкових газів;

$T_r = 900 \text{ К}$ – температура залишкових газів.

Циклова масова подача палива

$$\Delta m_{\text{тц}} = \frac{\Delta m_{\text{вц}}}{\alpha \cdot \ell_o} = \frac{254 \cdot 10^{-6}}{0,88 \cdot 14,96} = 19,31 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл}. \quad (4.15)$$

Середня температура стінок T_w залежить від типу двигуна, рівня форсування, режиму роботи, матеріалів основних деталей (поршня, кришки, клапанів, циліндра) [8]. Для двигуна Kawasaki Ninja ZX10R приймаємо $T_w = 570 \text{ К}$.

Початковий тиск дорівнює

$$p_a = p_k - \Delta p_{\text{вп}} = 101325 - 4053,0 = 97272,0 \text{ Па}. \quad (4.16)$$

Початкова температура

$$T_a = \frac{1}{1 + \gamma} (T_k + \Delta T_{\text{вп}} + \gamma T_r), \quad (4.17)$$

$$T_a = \frac{1}{1 + 0,07} (293,15 + 4 + 0,07 \cdot 900) = 336,6 \text{ К}.$$

Початкова маса робочого тіла в циліндрі

$$m_a = (1 + \gamma) \cdot \Delta m_{\text{вц}} = (1 + 0,07) \cdot 254 \cdot 10^{-6} = 272 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл.} \quad (4.18)$$

Початковий об'єм циліндра

$$V_a = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot V_h = \frac{13}{13 - 1} \cdot 0,2494 \cdot 10^{-3} = 270 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (4.19)$$

Початкові параметри повинні задовольняти рівнянню стану, яке в даному випадку є контрольним [8]:

$$p_a V_a = R m_a T_a, \quad (4.20)$$

$$97272,0 \cdot 270 \cdot 10^{-6} = 287 \cdot 272 \cdot 10^{-6} \cdot 336,6,$$

$$26,2634 = 26,2763.$$

Похибка розрахунку за рівнянням стану складає 0,05 %.

Для виконання динамічного розрахунку необхідно знати маси частин, що поступально рухаються і обертаються.

Приведена маса частин, що поступально рухаються, включає масу поршневого комплексу (поршня, пальця, кілець) і частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця [8]:

$$m_A = [m'_п + (0,2 \dots 0,3) \cdot m'_{\text{ш}}] \cdot F_{\text{п}}, \quad (4.21)$$

$$m_A = (40 + 0,25 \cdot 50) \cdot 4,53 \cdot 10^{-3} = 0,238 \text{ кг},$$

де коефіцієнт 0,25 представляє частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця.

Величини $m'_п$ і $m'_{\text{ш}}$ визначаємо на основі зважування деталей циліндро-поршневої групи та шатуна двигуна Kawasaki Ninja ZX10R.

За розрахованими в розділі 4.2 даними заповнюємо таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові дані для розрахунку циклу двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі

Найменування величини	Численні величини	Позначення і одиниці виміру
Тип двигуна		
1. Теплота згорання палива	44000000	$H_{\text{ут}}$, Дж/кг
2. Показник процесу згорання	3,5	m_1
Конструктивні дані		
3. Кількість циліндрів	4	i
4. Рядний; V-подібний	рядний	–
5. Діаметр циліндра	0,076	D , м
6. Площа поршня	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{п}}$, м ²
7. Радіус кривошипа	0,0275	$r_{\text{к}}$, м
8. Відношення $\lambda_{\text{к}} = \frac{r_{\text{к}}}{L_{\text{ш}}}$	0,258	$\lambda_{\text{к}}$
9. Площа теплообміну поршня	$4,99 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{п}}'$, м ²
10. Площа теплообміну кришки	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{к}}$, м ²
11. Об'єм камери стиснення	$20,8 \cdot 10^{-6}$	$V_{\text{с}}$, м ³
Наддув		
12. Тиск наддуву	101325	$p_{\text{к}}$, Па
13. Температура повітря	293,15	$T_{\text{к}}$, К
Регульовальні дані		
14. Кут початку згорання	317,5	$\varphi_{\text{с}}$, ° ПКВ
15. Кут кінця згорання	377,5	$\varphi_{\text{з}}$, ° ПКВ
Режимні дані		
16. Кутова швидкість валу	1360,7	ω , рад/с
17. Коефіцієнт надлишку повітря	0,88	α
18. Циклова подача палива	$19,31 \cdot 10^{-6}$	$\Delta m_{\text{тц}}$, кг/цикл
19. Середня температура стінок	570	T_{w} , К
Початкові умови		
20. Тиск	97272	$p_{\text{а}}$, Па
21. Температура	336,6	$T_{\text{а}}$, К
22. Маса робочого тіла	$272 \cdot 10^{-6}$	$m_{\text{а}}$, кг/цикл
23. Об'єм робочої порожнини	$270 \cdot 10^{-6}$	$V_{\text{а}}$, м ³
Дані до динамічного розрахунку		
24. Маса поступально рухомих частин (приведена)	0,238	$m_{\text{А}}$, кг
Розрахунковий крок	1	$\Delta\varphi$, град.

Таблиця 4.2 – Протокол теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі

φ, °ПКВ	p, Па	T, К	m, кг	V, м ³
1	2	3	4	5
0	97272,0	336,6	0,000272	0,000021
10	97272,0	336,6	0,000272	0,000023
20	97272,0	336,6	0,000272	0,000030
30	97272,0	336,6	0,000272	0,000042
40	97272,0	336,6	0,000272	0,000057
50	97272,0	336,6	0,000272	0,000075
60	97272,0	336,6	0,000272	0,000095
70	97272,0	336,6	0,000272	0,000117
80	97272,0	336,6	0,000272	0,000139
90	97272,0	336,6	0,000272	0,000161
100	97272,0	336,6	0,000272	0,000183
110	97272,0	336,6	0,000272	0,000202
120	97272,0	336,6	0,000272	0,000220
130	97272,0	336,6	0,000272	0,000235
140	97272,0	336,6	0,000272	0,000247
150	97272,0	336,6	0,000272	0,000257
160	97272,0	336,6	0,000272	0,000264
170	97272,0	336,6	0,000272	0,000269
180	94297,1	336,6	0,000272	0,000270
190	95125,3	337,8	0,000272	0,000269
200	97398,9	340,5	0,000272	0,000264
210	101293,2	344,6	0,000272	0,000257
220	107123,0	350,5	0,000272	0,000247
230	115390,0	358,4	0,000272	0,000235
240	126864,9	368,6	0,000272	0,000220
250	142728,0	381,6	0,000272	0,000202
260	164813,8	398,0	0,000272	0,000183
270	196043,8	418,6	0,000272	0,000161
280	241215,0	444,5	0,000272	0,000139
290	308478,4	477,1	0,000272	0,000117
300	412168,6	518,6	0,000272	0,000095
310	578190,7	571,4	0,000272	0,000075
320	853410,6	638,6	0,000272	0,000057
330	1354866,7	743,4	0,000272	0,000042
340	2798441,0	1111,1	0,000274	0,000030
350	7317297,4	2187,8	0,000279	0,000023
360	13721989,1	3579,2	0,000287	0,000021
370	13440920,0	3852,5	0,000291	0,000023
380	9480538,9	3534,7	0,000291	0,000030

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
390	6173049,0	3164,1	0,000291	0,000042
400	4077911,1	2849,4	0,000291	0,000057
410	2813789,2	2596,6	0,000291	0,000075
420	2039431,6	2396,0	0,000291	0,000095
430	1548581,3	2236,6	0,000291	0,000117
440	1225822,6	2109,1	0,000291	0,000139
450	1006424,8	2006,4	0,000291	0,000161
460	853087,0	1923,5	0,000291	0,000183
470	743577,6	1856,4	0,000291	0,000202
480	664196,0	1802,1	0,000291	0,000220
490	606243,9	1758,4	0,000291	0,000235
500	564065,9	1723,6	0,000291	0,000247
510	533932,6	1696,3	0,000291	0,000257
520	513388,7	1675,7	0,000291	0,000264
530	500870,0	1661,0	0,000291	0,000269
540	487904,8	1652,4	0,000291	0,000270
550	409827,9	1652,4	0,000291	0,000269
560	331751,0	1652,4	0,000291	0,000264
570	253674,1	1652,4	0,000291	0,000257
580	175597,2	1652,4	0,000291	0,000247
590	105328,0	1652,4	0,000291	0,000235
600	105328,0	1652,4	0,000291	0,000220
610	105328,0	1652,4	0,000291	0,000202
620	105328,0	1652,4	0,000291	0,000183
630	105328,0	1652,4	0,000291	0,000161
640	105328,0	1652,4	0,000291	0,000139
650	105328,0	1652,4	0,000291	0,000117
660	105328,0	1652,4	0,000291	0,000095
670	105328,0	1652,4	0,000291	0,000075
680	105328,0	1652,4	0,000291	0,000057
690	105328,0	1652,4	0,000291	0,000042
700	105328,0	1652,4	0,000291	0,000030
710	105328,0	1652,4	0,000291	0,000023
720	105328,0	1652,4	0,000291	0,000021

ZX10R

Дата: 10.10.2025

 $L_i = 419,903079$ Дж/цикл $p_i = 1685342,480766$ Па $\eta_i = 0,594630$ $g_i = 0,165552$ кг/(кВт·год)

4.3 Контроль і аналіз результатів теплового розрахунку

Проведено розрахунок циклу двигуна Kawasaki Ninja ZX10R в комп'ютерній програмі Engine Calculation, результати розрахунку отримано у вигляді протоколу (таблиця 4.2).

Протокол теплового розрахунку містить запис параметрів робочого тіла (тиску p , температури T , маси m , об'єму V) при різних кутах φ повороту кривошипа колінчатого валу (ПКВ). З метою скорочення протокол подано з кроком запису 10° ПКВ.

В результаті теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation отримано наступні індикаторні показники циклу:

- індикаторна робота $L_i = 419,903$ Дж/цикл;
- середній індикаторний тиск $p_i = 1,6853$ МПа;
- індикаторний ККД $\eta_i = 0,5946$;
- питома індикаторна витрата палива $g_i = 0,1656$ кг/(кВт·год).

Контрольною величиною для оцінки результатів розрахунку є ефективна потужність двигуна, яка розраховується за формулою:

$$N_e = i \cdot L_i \cdot \frac{n}{\tau} \cdot \eta_m = 4 \cdot 419,903 \cdot \frac{13000}{2 \cdot 60} \cdot 0,8 = 145,57 \text{ кВт}, \quad (4.22)$$

де $\eta_m = 0,8$ – прийнятий механічний ККД бензинового двигуна.

Ефективну питому витрату палива розраховуємо за формулою

$$g_e = g_i / \eta_m = 0,1656 / 0,8 = 0,2070 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}. \quad (4.23)$$

Середній ефективний тиск:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m = 1,6853 \cdot 0,8 = 1,348 \text{ МПа.} \quad (4.24)$$

Ефективний ККД

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = 0,5946 \cdot 0,8 = 0,476. \quad (4.25)$$

Розраховані похибки складають: за ефективною потужністю 0,3 %, за середнім ефективним тиском 0,1 % (у порівнянні отриманих значень вихідними даними до теплового розрахунку).

Основними параметрами, які характеризують механічну і термічну напруженість деталей двигуна, є максимальні тиск і температура робочого тіла. З протоколу теплового розрахунку визначаємо величину максимального тиску $p_{\max} = 14,44$ МПа (при 364° ПКВ) і максимальної температури $T_{\max} = 3869,9$ К (при 368° ПКВ). Ці величини незначно перевищують максимально рекомендовані для бензинових ДВЗ [8], що вказує на високий рівень форсування двигуна.

За результатами розрахунку циклу двигуна на номінальному режимі будуюмо згорнуту індикаторну діаграму $p(V)$ і $T(V)$ (рисунок 3.1).

4.4 Висновки за розділом

Виконано термодинамічний розрахунок робочого циклу 4-тактного бензинового двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі роботи. Розрахунок виконуємо за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation за стандартною методикою. Розраховані індикаторні показники двигуна Kawasaki Ninja ZX10R відповідають відповідним показникам ДВЗ аналогічних конструкцій, а також вимогам та рекомендаціям [8]. Розраховані ефективні

показники двигуна на номінальному режимі: ефективна потужність $N_e = 145,57$ кВт; ефективна питома витрата палива $g_e = 0,2070$ кг/(кВт·год); середній ефективний тиск $p_e = 1,348$ МПа; ефективний ККД $\eta_e = 0,476$. Розраховані ефективні показники двигуна відрізняються від вихідних величин не більше, ніж на 0,3 %, що свідчить про правильність виконаного теплового розрахунку.

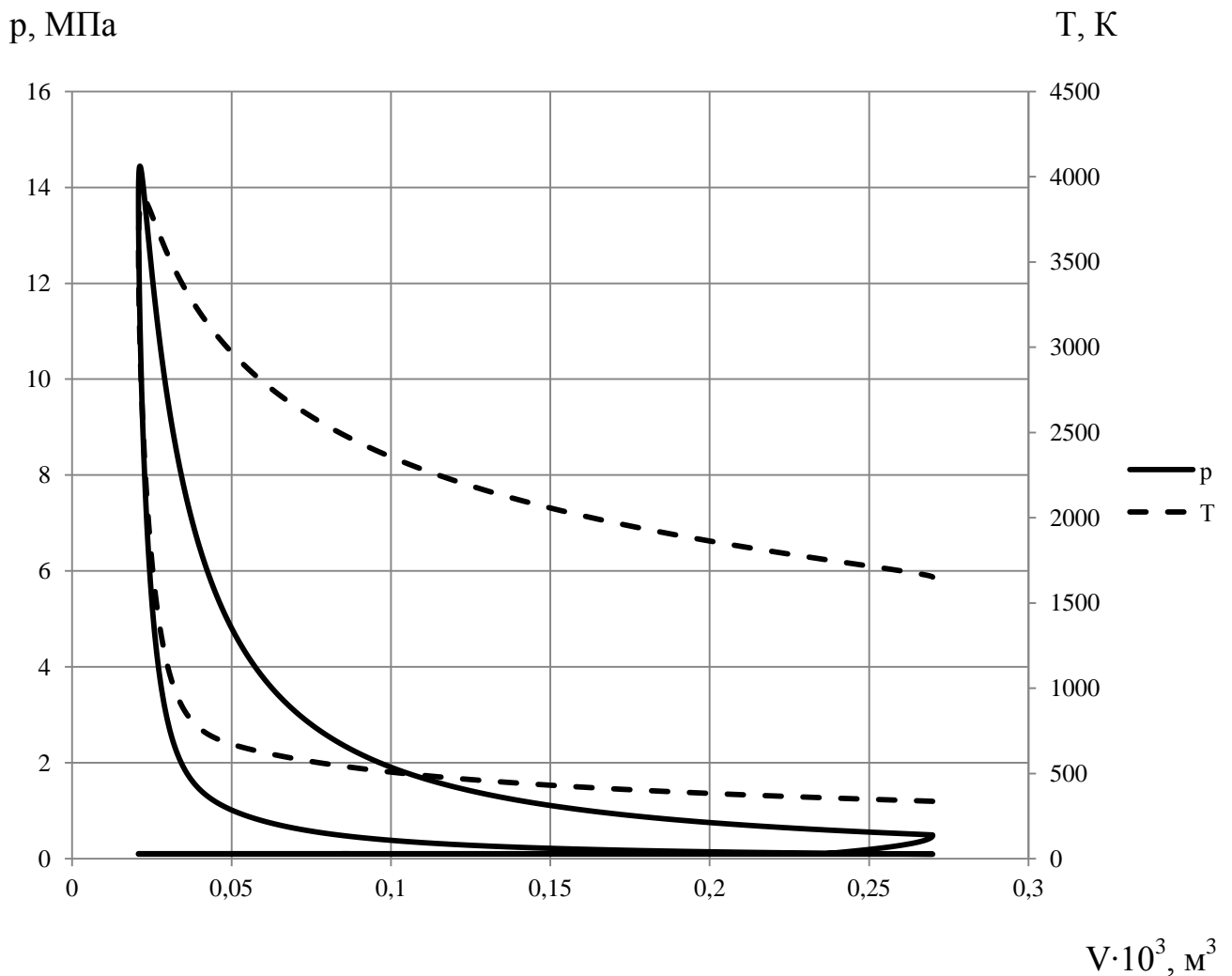


Рисунок 4.1 – Індикаторна діаграма тиску $p(V)$ та температури в циліндрі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без врахування динамічного наддуву

5 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЦИКЛУ ДВИГУНА KAWASAKI NINJA ZX10R З ВРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНОГО НАДДУВУ

В розділі 3.1 роботи визначено характер залежності зростання величина тиску динамічного (швидкісного) наддуву при зростанні швидкості руху транспортного засобу $p_d = f(v)$. Знайдено квадратичне рівняння, яке дозволяє розрахувати величину p_d при будь-якому значенні v в межах від 0 до 350 км/год:

- при $v = 0$ км/год $p_d = 0$ кПа – динамічний наддув відсутній;
- при $v = 100$ км/год = 27,78 м/с $p_d = 0,4646$ кПа;
- при $v = 200$ км/год = 55,56 м/с $p_d = 1,8585$ кПа;
- при $v = 300$ км/год = 83,33 м/с $p_d = 4,1816$ кПа;

Індикаторні та ефективні показники двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без врахування динамічного наддуву розраховані в розділі 4 роботи.

Показники двигуна з врахуванням величини динамічного наддув виконуємо аналогічно з тією ж методикою, з наступними змінами:

- розраховується тиск наддуву $p_k' = p_k + p_d$;
- перерахунок щільності заряду на вході в циліндр ρ_k за формулою (4.12);
- перерахунок втрат тиску на впуску за формулою $\Delta p_{вп}$ за формулою (4.14);
- перерахунок коефіцієнта наповнення η_v за формулою (4.13);
- перерахунок циклового масового заряду повітря в циліндрі $\Delta m_{вц}$ за формулою (4.11);
- перерахунок циклової масової подачі палива $\Delta m_{тц}$ за формулою (4.15);
- перерахунок початкового тиску p_a за формулою (4.16);
- перерахунок початкової маси робочого тіла в циліндрі m_a за формулою (4.18).

Величина температури на впуску T_0 залишається незмінною.

В таблиці 5.1 наведено вихідні дані до теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі з врахуванням динамічного наддуву.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі з врахуванням динамічного наддуву

Величина	Числові значення			
	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
v , км/год	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
p_k , Па	101325			
p_D , Па	0	464,6	1858,5	4181,6
p_k' , Па	101325	101789,6	103183,5	105506,6
ρ_k , кг/м ³	1,204	1,210	1,226	1,254
$\Delta p_{вп}$, Па	4053,0	4071,6	4127,3	4220,3
η_v	0,847	0,847	0,847	0,847
$\Delta m_{вц}$, кг/цикл	$254 \cdot 10^{-6}$	$255 \cdot 10^{-6}$	$259 \cdot 10^{-6}$	$265 \cdot 10^{-6}$
$\Delta m_{тц}$, кг/цикл	$19,31 \cdot 10^{-6}$	$19,40 \cdot 10^{-6}$	$19,67 \cdot 10^{-6}$	$20,11 \cdot 10^{-6}$
p_a , Па	97272	97718	99056	101286
m_a , кг/цикл	$272 \cdot 10^{-6}$	$273 \cdot 10^{-6}$	$277 \cdot 10^{-6}$	$283 \cdot 10^{-6}$

Виконуємо розрахунок термодинамічного циклу двигуна за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation для двигуна з врахуванням величин p_k' , $\Delta m_{тц}$, p_a , m_a для динамічного наддуву (див. табл. 5.1), отримані протоколи розрахунку наведено в додатку Б. Індикаторні показники двигуна наведено в таблиці 5.2.

З таблиці 5.2 випливає, при швидкості руху мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R $v = 300$ км/год на номінальному режимі, у порівнянні з $v = 0$ км/год, індикаторні показники двигуна змінюються наступним чином:

- індикаторна робота L_i збільшується на 4,2 %;
- середній індикаторний тиск p_i збільшується на 4,2 %;

- питома індикаторна витрата палива $g_i = 0,1656$ кг/(кВт·год) зменшується на 0,06 %;
- індикаторний ККД η_i збільшується на 0,05 %.

Таблиця 5.2 – Індикаторні показники двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без ($v = 0$ км/год) та з врахуванням динамічного наддуву ($v = 100...30$ км/год)

Величина	Числові значення			
	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
v , км/год	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
L_i , Дж/цикл	419,903	421,835	426,960	437,531
p_i , МПа	1,6853	1,6931	1,7137	1,7561
g_i , кг/(кВт·год)	0,1656	0,1656	0,1659	0,1655
η_i	0,5946	0,5946	0,5936	0,5949

За формулами (4.22–4.25) розраховано ефективні показник двигуна, результати занесено до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Ефективні показники двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без ($v = 0$ км/год) та з врахуванням динамічного наддуву ($v = 100...30$ км/год)

Величина	Числові значення			
	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
v , км/год	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
N_e , кВт	145,57	146,24	148,01	151,68
p_e , МПа	1,348	1,354	1,371	1,405
g_e , кг/(кВт·год)	0,2070	0,2070	0,2074	0,2069
η_e	0,476	0,476	0,475	0,476

З таблиці 5.3 випливає, при швидкості руху мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R $v = 300$ км/год на номінальному режимі, у порівнянні з $v = 0$ км/год, ефективні показники двигуна змінюються наступним чином:

- ефективна потужність двигуна N_e збільшується на 4,2 % (рисунок 5.1);
- середній ефективний тиск p_e збільшується на 4,2 %;
- ефективна питома витрата палива g_e зменшується на 0,05 %;
- ефективний ККД η_e – незмінний.

N_e , кВт

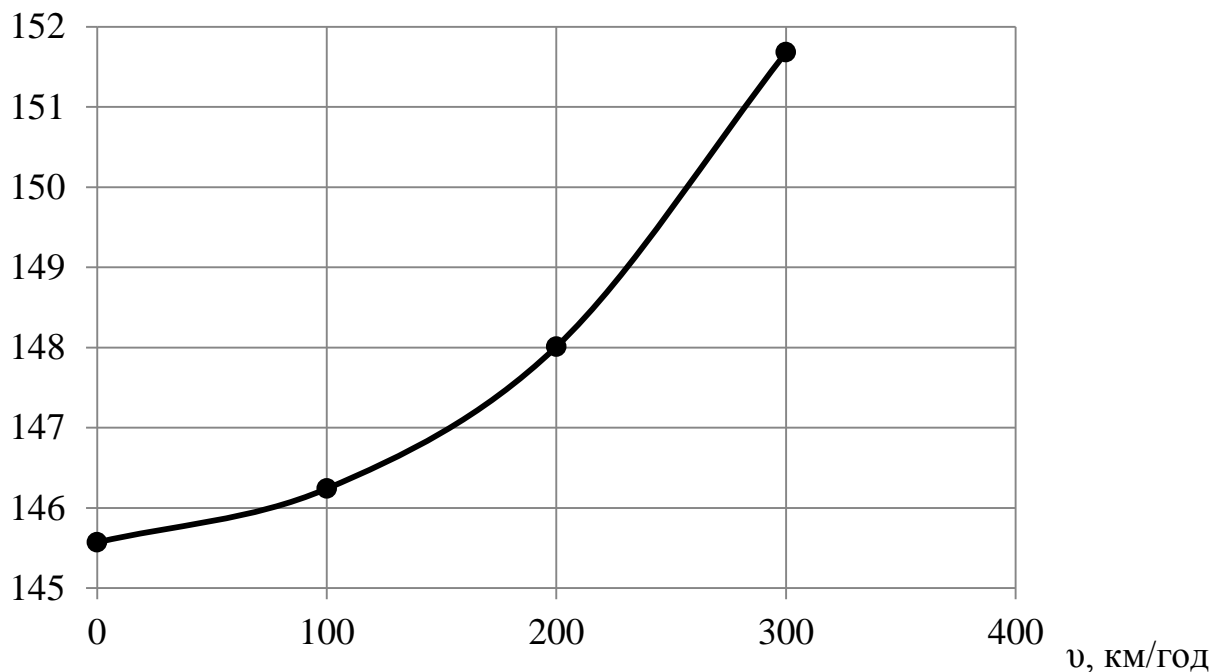


Рисунок 5.1 – Залежність величини максимальної ефективної потужності двигуна Kawasaki Ninja ZX10R від швидкості руху за рахунок динамічного наддуву

В таблиці 5.4 показано значення максимального тиску та максимальної температури робочого тіла за цикл. На рисунку 5.2 представлена індикаторна діаграма тиску $p(V)$ в циліндрі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без врахування динамічного наддуву (0 км/год) та з динамічним наддувом при 300 км/год.

З таблиці 5.4 та рисунку 5.2 видно, що по мірі збільшення швидкості транспортного мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R від 0 до 300 км/год за рахунок динамічного наддуву відбуваються зміни робочого циклу двигуна, які, зокрема, призводять до збільшення максимального тиску p_{\max} на 0,597 МПа (на 4,2 %) та максимальної температури T_{\max} на 3,3 К (на 0,1 %).

Таблиця 5.4 – Максимальні за цикл тиск p_{\max} та температура T_{\max} робочого тіла в циліндрі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R

Величина	Числові значення			
	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
v , км/год	0 км/год	100 км/год	200 км/год	300 км/год
p_{\max} , МПа	14,440	14,504	14,656	15,037
T_{\max} , К	3869,9	3872,6	3909,8	3873,2

p , МПа

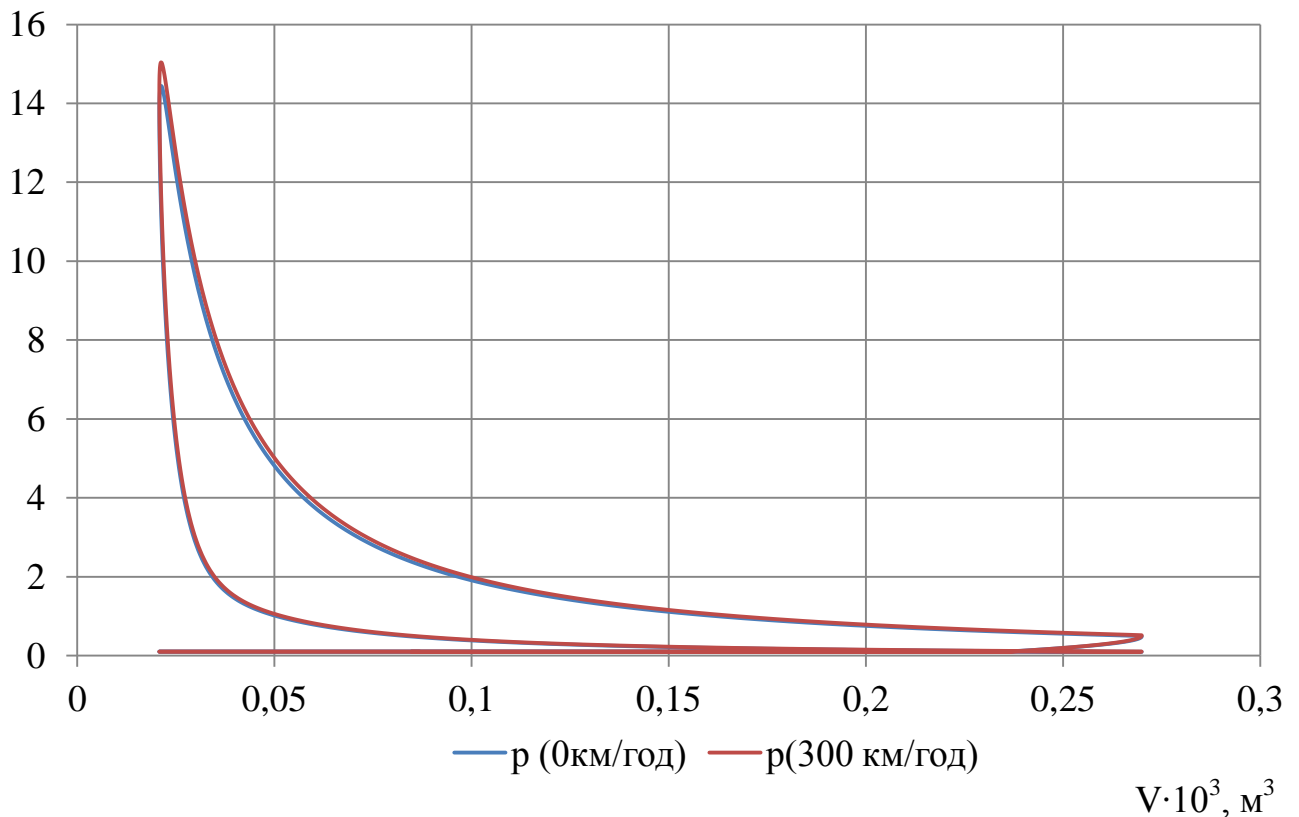


Рисунок 5.2 – Індикаторна діаграма тиску $p(V)$ в циліндрі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі без врахування динамічного наддуву (0 км/год) та з динамічним наддувом при 300 км/год

Висновки за розділом.

З наведених вище даних випливає, що явище динамічного (швидкісного) наддуву позитивно впливає на показники бензинового ДВЗ для швидкісних транспортних засобів. Головним технічним ефектом є збільшення ефективної потужності двигуна (див. рисунок 5.1):

- на 100 км/год – на 0,5 %;
- на 200 км/год – на 1,7 %;
- на 300 км/год – на 4,2 %.

Нелінійне зростання потужності N_e (і тиску p_e) пояснюється тим, що динамічний тиск повітря (див. формулу 3.1) залежить, зокрема, від квадрату швидкості руху повітря u .

Основні показники, що характеризують газообмін в циліндрі та процесі впуску – коефіцієнт залишкових газів γ , коефіцієнт надлишку повітря α , коефіцієнт наповнення η_v – при застосуванні динамічного наддуву залишаються незмінними. Причиною збільшення потужності двигуна є збільшення циклової кількості повітря $\Delta m_{вц}$ та циклової кількості палива $\Delta m_{тц}$ (див. таблицю 5.1).

ВИСНОВКИ

Робота присвячена аналізу та оцінці впливу параметрів динамічного (швидкісного) наддуву на індикаторні та ефективні характеристики 4-тактного бензинового двигуна швидкісного мотоцикла. Актуальність дослідження визначається зростаючими вимогами до підвищення ефективності силових установок при одночасному обмеженні їхніх масогабаритних показників, що особливо важливо у сфері фототехніки та легкомоторної авіації.

Динамічний (швидкісний) наддув – це спосіб підвищення тиску у впускному тракті ДВЗ за рахунок набігаючого потоку повітря. Для його реалізації потрібні:

- власне швидкісний натиск (набігаючий потік)
- правильно спрофільований і розташований повітрозбірник.

Використання динамічного наддуву найбільш ефективно на атмосферних ДВЗ наземних і літальних транспортних засобів, що рухаються на великих швидкостях (понад 140...200 км/год).

З аналізу літературних джерел встановлено, що методик розрахунку впливу динамічного наддуву на показники бензинового двигуна мотоцикла немає. Наявні публікації присвячені вирішенню окремих практичних питань в конкретних двигунах. Визначено основні показники, що характеризують газообмін в циліндрі та процес впуску: коефіцієнт залишкових газів γ , коефіцієнт надлишку повітря α , коефіцієнт наповнення η_v .

Розроблена методика, за допомогою якої досліджено вплив динамічного наддуву на показники 4-тактного бензинового двигуна швидкісного мотоцикла на прикладі двигуна Kawasaki Ninja ZX10R.

Розраховано величину динамічного наддуву шляхом знаходження динамічного тиску повітря при можливих швидкостях руху мотоцикла від 0 до 350 км/год.

Побудовано графік залежності динамічного тиску повітря p_d від

швидкості руху транспортного засобу v (див. рисунок 3.1) та апроксимацією знайдено квадратичне рівняння, яке описує дану функцію. Максимальне значення динамічного тиску повітря при $v = 300$ км/год складає $p_d = 4181,6$ Па.

Виконано тепловий розрахунок двигуна при роботі на номінальному режимі в комп'ютерній програмі Engine Calculation, при відсутності динамічного наддуву, а також при його наявності, при швидкості руху мотоцикла 100 км/год, 200 км/год, 300 км/год; розраховано індикаторні та ефективні показники двигуна; побудовано індикаторні діаграми циклу.

Встановлено, що при швидкості руху мотоцикла Kawasaki Ninja ZX10R $v = 300$ км/год на номінальному режимі, у порівнянні з $v = 0$ км/год, показники двигуна змінюються наступним чином:

- ефективна потужність двигуна N_e та середній ефективний тиск p_e збільшуються на 4,2 %;
- ефективна питома витрата палива g_e та ефективний ККД η_e залишаються незмінні;
- максимальний тиску робочого тіла за цикл p_{max} збільшується на 0,597 МПа (на 4,2 %);
- максимальна температура T_{max} робочого тіла за цикл залишається незмінною.

Встановлено, що основні показники, що характеризують газообмін в циліндрі та процесі впуску – коефіцієнт залишкових газів γ , коефіцієнт надлишку повітря α , коефіцієнт наповнення η_v – при застосуванні динамічного наддуву залишаються незмінними. Причиною збільшення потужності двигуна є збільшення циклової кількості повітря $\Delta m_{вц}$ та циклової кількості палива $\Delta m_{тц}$.

Результати роботи підтверджують, що динамічний наддув може забезпечити відчутне підвищення ефективної потужності без додаткового ускладнення або збільшення маси силового агрегату, що є критично важливим для мототехніки та споріднених галузей.

Рекомендації. Динамічний наддув доцільно використовувати на транспортних засобах, які їздять/літають зі швидкістю понад 150 км/год. При менших швидкостях приріст динамічного тиску, а отже і ефективної потужності двигуна складають менше 1 %, а повітрозбірник значно погіршує аеродинамічний опір корпусу/кузова/фюзеляжу транспортного засобу, нівелюючи додаткову потужність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Чмир В. Аналіз способів підвищення ефективності поршневих двигунів внутрішнього згорання в ході їх застосування на автомобільній техніці під час організації автомобільних перевезень // Збірник наукових праць Національної Академії Державної прикордонної служби України. серія військові та технічні науки. 2025. № 2(99). С. 142–151. DOI: 10.32453/3.v99i2.1858

2. Ram-air intake. Сайт «Wikipedia». URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ram-air_intake

3. Цимбал С. В., Закорчевський А. В., Березовський Є. Е., Козак Р. О. Перспективні тенденції розвитку поршневих ДВЗ і агрегатів на їхній базі. Вінниця : ВНТУ, 2023. 8 с. URL : <https://atm.vntu.edu.ua/articles/15.pdf>

4. Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків : Прапор, 2004. 384 с.

5. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В., Лук'яненко В. П. Дослідження впливу резонансного наддуву бензинового двотактного двигуна на його швидкісну характеристику // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2024. № 4. С. 59–66. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-4-6

6. Методичні вказівки до переддипломної практики, виконання та захисту кваліфікаційної роботи магістрів, що навчаються за спеціальністю G11 «Машинобудування», освітня програма «Двигуни внутрішнього згорання». 2-ге видання, перероб. і допов. / Укл. : Г. І. Слинько, В. І. Кубіч, Р. Ф. Сухонос. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. 35 с.

7. Дьяченко В. Г. Двигуни внутрішнього згорання. Теорія : Підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2008. 488 с.

8. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Слинько В. В. Тепловий і динамічний розрахунок ДВЗ : навчальний посібник з курсового проєктування. Запоріжжя :

НУ «Запорізька політехніка», 2024. 130 с.

9. Шапко В. Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії двигунів внутрішнього згоряння: підручник. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 180 с.

10. Тимченко І. І., Жадан П. В., Жилін С. С. Системи ДВЗ: Навчальний посібник. Харків : Вид-во ХНАДУ. 2007. 204 с.

11. Dziubak T., Karczewski M. Experimental Study of the Effect of Air Filter Pressure Drop on Internal Combustion Engine Performance // *Energies*. 2022. 15(9):3285. DOI: 10.3390/en15093285

12. Підручник з будови автомобіля. Посібник для автомобілістів-початківців. Моноліт. 288 с.

13. Слинько Г. І., Чишко Д. П., Сухонос Р. Ф. Розробка методики дослідження стану повітря у впускній системі двигуна // Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : II Міжнарод. наук.-техн. інтернет-конф., 25-27 березня 2020 р. : Тези доповідей. Рівне : Нац. ун-т водного господарства та природокористування. 2020. С. 34–35.

14. Слинько Г. І., Чишко Д. П., Сухонос Р. Ф., Яровий В. С., Рогов Я. В. Методика визначення тиску повітря у впускній системі ДВЗ // Тиждень науки-2020. Транспортний факультет : щоріч. наук.-практ. конф., 13-17 квітня 2020 р. : тези доп. НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 46–47.

15. Слинько Г. І., Невретов В. В. Дослідження впливу конструкції впускної системи двигуна ВАЗ 2101 на поліпшення експлуатаційних характеристик // Вісник двигунобудування. 2012. № 1. С.78–82.

16. Hispano HA-1112/Bf-109G-2. Сайт «Airliners». 2011. URL : <https://www.airliners.net/photo/Untitled/Hispano-HA-1112-Bf-109G-2/1992751/L>

17. Rendle S., Legg A. K. Peugeot 405 1988 to 1997 (E to P registration) Petrol : Haynes Service and Repair Manual. Haynes Publishing, 1996. 302 p.

18. Ford Fairlane Thunderbolt. Сайт «Wikipedia». URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Fairlane_Thunderbolt

19. Airboxes and Ram Effect. 2008. Сайт «Autosport». URL: <https://forums.autosport.com/topic/103265-airboxes-and-ram-effect>
20. Does ram air work? 2012. Сайт «Grassroots Motorsports». URL: <https://grassrootsmotorsports.com/forum/grm/article-topic-does-ram-air-work/48999/page1>
21. Cabello S., Baz P. Sistema aerodinámico Ram-Air: funcionamiento. 2013. Сайт «Motociclismo». URL: https://www.motociclismo.es/industria/el-ram-air_176725_102.html
22. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. Автомобільні двигуни : Підручник. Київ : Арістей, 2006. 476 с.
23. Parry L., Könözy L., Temple C. Airbox design, analysis and improvement for a highperformance road racing sidecar // Lect. Notes Mech. Eng. 0, 9783319756769 p. 545–562. DOI: 10.1007/978-3-319-75677-6_48
24. Kee R. J., Maynes B. D. J., Kenny R. G., Mackey D., Foley L. Prediction of Formula 1 Engine and Airbox Performance using Coupled Virtual 4-Stroke and CFD Simulations // SAE Technical Papers. 2003. 111-3 DOI: 10.4271/2002-01-3318
25. Tan J., Abu Bakar N. Z. Design improvement of an airbox for a passenger vehicle // Journal of Physics: Conference Series. 2120 (2021) 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2120/1/012010
26. Teck Yap J., Abu Bakar N. Z., Shaikh Dawood N. F., Rosli M. A. Design Improvements of Acoustic Response of an Automotive Air Intake System // MATEC Web of Conferences 335:03017. DOI: 10.1051/mateccconf/202133503017
27. Жовінський Н. Е. Силові авіаційні установки. М., 1948. 432 с.
28. Kawasaki ZX-10R Ninja. Сайт «MCS». URL: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/kawasaki/kawasaki_zx10R%2011.htm
29. Kawasaki Ninja ZX-10R, Ninja ZX-10R ABS Motorcycle Service Manual. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. 2015. 787 p.
30. Kawasaki Ninja ZX-10R Motorcycle Service Manual. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. 2008. 694 p.
31. 2006 Kawasaki Ninja ZX-10R Racing Kit Manual. Kawasaki Heavy

Industries, Ltd. 2006. 82 p.

32. Henning A. First Ride Review: 2016 Kawasaki ZX-10R ABS. 2016. Сайт «Motorcyclist». URL: <https://www.motorcyclistonline.com/first-ride-review-2016-kawasaki-zx-10r-abs>

33. Ram Air Intake Tube Duct Fit For Kawasaki Ninja ZX10R ZX-10R 2016-2020 19 Black. Сайт «ebay». 2025. URL: <https://www.ebay.com/itm/225763499308>

34. Слинько Г. І., Сухонос Р. Ф., Іванов П. Є. Комп'ютерна програма для теплового розрахунку робочого циклу двигуна внутрішнього згорання // Інформаційні технології: теорія і практика : Матеріали II Всеукр. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 4 квітня 2019 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 96–97.

35. Slynko G., Sukhonos R., Ivanov P. Computer Program for Calculation of the Operating Cycle of Internal Combustion Engine // Тиждень науки-2019. Транспортний факультет : щоріч. наук.-практ. конф., 15-19 квітня 2019 р. : тези доп. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 74–75.

36. Slynko G., Sukhonos R., Ivanov P. Computer Program for Calculation of the Operating Cycle of Internal Combustion Engine // Тиждень науки-2019. Транспортний факультет : щоріч. наук.-практ. конф., 15-19 квітня 2019 р. : тези доп. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 74–75.

37. Фролов М. В. Наукові дослідження та моделювання технічних об'єктів в машинобудуванні. Навчальний та практичний посібник (препринт). Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2025. 238 с.

38. Руденко В. М. Математична статистика. Навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.

39. Бідюк П. І., Ткач Б. П., Харрінгтон Т. Математична статистика: навч. посіб. Київ : ДП «Вид. дім «Персонал», 2018. 348 с.

40. Євсєєва Н.О., Тимошенко В.О. Впускна та випускна системи ДВЗ / Тиждень науки. Транспортний факультет: щоріч. наук.-практ. конф., 14-18 квітня 2025 р.: тези доп. НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 63–64.

ДОДАТОК А

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАФЕДРА «АВТОМОБІЛІ, ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ ТА ГІБРИДНІ
ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ»

АКТ

впровадження результатів роботи

24 листопада 2025 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови зав. кафедри «АТД та ГЕУ», к.т.н., доцент Олександр АРТЮХ,
члени комісії професора кафедри «АТД та ГЕУ», д.т.н., професор Георгій
СЛИНЬКО; доцент кафедри «АТД та ГЕУ» Наталія ЄВСЄЄВА; старший
викладач кафедри «АТД та ГЕУ» Роман СУХОНОС.

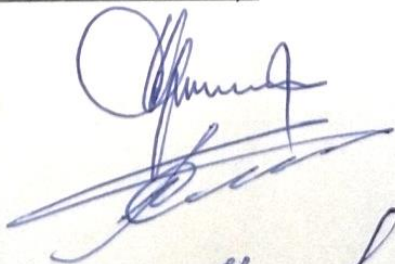
Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження науково-
дослідної роботи НДР 01924 «Технічне та фізико-математичне моделювання
роботи вузлів та деталей теплових двигунів різного призначення»,
виконаної у НУ «Запорізька політехніка» згідно п. 1.2 «Моделювання впливу
режимів роботи теплових двигунів на їх характеристики» тематичного плану
НДР 01924 на 2025-2026 н.р.,

та установила, що результати вказаної роботи впроваджені в навчальний процес
кафедри «Автомобілі, теплові двигуни та гібридні енергетичні установки» НУ
«Запорізька політехніка».

Вид та об'єм впровадження можливі величини тиску динамічного
наддуву та їх вплив на індикаторні та ефективні показники 4-тактного
бензинового ДВЗ впроваджено в навчальний процес в якості порівняльних
даних в курсі дисципліни «Теорія двигунів внутрішнього згорання», «Основи
конструювання двигунів внутрішнього згорання» підготовки бакалаврів і
магістрів, що навчаються за освітньою програмою «Двигуни внутрішнього
згорання» спеціальності G11 Машинобудування (за спеціалізаціями).

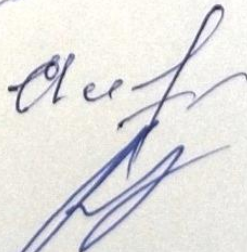
Досягнуті технічні результати, їх рівень підвищення рівня підготовки фахівців
освітньої програми «Двигуни внутрішнього згорання» спеціальності G11
Машинобудування (за спеціалізаціями).

Голова комісії



Олександр АРТЮХ

Члени комісії



Георгій СЛИНЬКО

Наталія ЄВСЄЄВА

Роман СУХОНОС

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Протокол теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі при динамічному наддуві $p_d = 464,6$ Па

φ , °ПКВ	p , Па	T , К	m , кг	V , м ³
0	97 718,0	336,6	0,000273	0,000021
30	97 718,0	336,6	0,000273	0,000042
60	97 718,0	336,6	0,000273	0,000095
90	97 718,0	336,6	0,000273	0,000161
120	97 718,0	336,6	0,000273	0,000220
150	97 718,0	336,6	0,000273	0,000257
180	94 643,7	336,6	0,000273	0,000270
210	101 665,5	344,6	0,000273	0,000257
240	127 331,1	368,6	0,000273	0,000220
270	196 764,0	418,6	0,000273	0,000161
300	413 682,5	518,6	0,000273	0,000095
330	1 359 882,2	743,4	0,000273	0,000042
360	13 782 553,7	3 581,7	0,000288	0,000021
390	6 200 366,2	3 166,2	0,000292	0,000042
420	2 048 425,6	2 397,6	0,000292	0,000095
450	1 010 852,1	2 007,8	0,000292	0,000161
480	667 111,7	1 803,3	0,000292	0,000220
510	536 271,9	1 697,4	0,000292	0,000257
540	490 020,6	1 653,4	0,000292	0,000270
570	254 221,5	1 653,4	0,000292	0,000257
600	104 882,0	1 653,4	0,000292	0,000220
630	104 882,0	1 653,4	0,000292	0,000161
660	104 882,0	1 653,4	0,000292	0,000095
690	104 882,0	1 653,4	0,000292	0,000042
720	104 882,0	1 653,4	0,000292	0,000021

ZX10R 100

Дата: 19.10.2025

$L_i = 421,834925$ Дж/цикл

$p_i = 1693096,228395$ Па

$\eta_i = 0,594594$

$g_i = 0,165562$ кг/(кВт·год)

Таблиця Б.2 – Протокол теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі при динамічному наддуві $p_d = 1858,5$ Па

φ , °ПКВ	p , Па	T , К	m , кг	V , м ³
0	99 056,0	336,6	0,000273	0,000021
30	99 056,0	336,6	0,000273	0,000042
60	99 056,0	336,6	0,000273	0,000095
90	99 056,0	336,6	0,000273	0,000161
120	99 056,0	336,6	0,000273	0,000220
150	99 056,0	336,6	0,000273	0,000257
180	94 643,9	336,6	0,000273	0,000270
210	101 667,3	344,6	0,000273	0,000257
240	127 335,3	368,6	0,000273	0,000220
270	196 773,1	418,6	0,000273	0,000161
300	413 704,6	518,6	0,000273	0,000095
330	1 360 496,1	743,8	0,000273	0,000042
360	13 924 237,7	3 615,9	0,000288	0,000021
390	6 262 488,0	3 195,0	0,000293	0,000042
420	2 068 008,6	2 418,3	0,000293	0,000095
450	1 020 201,3	2 024,5	0,000293	0,000161
480	673 113,6	1 817,8	0,000293	0,000220
510	540 977,9	1 710,7	0,000293	0,000257
540	494 179,0	1 666,1	0,000293	0,000270
570	255 014,7	1 666,1	0,000293	0,000257
600	103 544,0	1 666,1	0,000293	0,000220
630	103 544,0	1 666,1	0,000293	0,000161
660	103 544,0	1 666,1	0,000293	0,000095
690	103 544,0	1 666,1	0,000293	0,000042
720	103 544,0	1 666,1	0,000293	0,000021

ZX10R 200

Дата: 19.10.2025

$L_i = 426,959979$ Дж/цикл

$p_i = 1713666,381268$ Па

$\eta_i = 0,593557$

$g_i = 0,165852$ кг/(кВт·год)

Таблиця Б.3 – Протокол теплового розрахунку двигуна Kawasaki Ninja ZX10R на номінальному режимі при динамічному наддуві $p_d = 4181,6$ Па

φ , °ПКВ	p , Па	T , К	m , кг	V , м ³
0	101 286,0	336,6	0,000283	0,000021
30	101 286,0	336,6	0,000283	0,000042
60	101 286,0	336,6	0,000283	0,000095
90	101 286,0	336,6	0,000283	0,000161
120	101 286,0	336,6	0,000283	0,000220
150	101 286,0	336,6	0,000283	0,000257
180	98 110,5	336,6	0,000283	0,000270
210	105 387,2	344,6	0,000283	0,000257
240	131 989,7	368,6	0,000283	0,000220
270	203 959,7	418,5	0,000283	0,000161
300	428 806,8	518,6	0,000283	0,000095
330	1 409 607,9	743,4	0,000283	0,000042
360	14 288 415,1	3 581,9	0,000298	0,000021
390	6 429 678,7	3 167,3	0,000303	0,000042
420	2 124 518,2	2 398,8	0,000303	0,000095
450	1 048 507,5	2 009,0	0,000303	0,000161
480	692 016,0	1 804,5	0,000303	0,000220
510	556 328,3	1 698,7	0,000303	0,000257
540	508 226,5	1 654,8	0,000303	0,000270
570	259 096,4	1 654,8	0,000303	0,000257
600	101 314,0	1 654,8	0,000303	0,000220
630	101 314,0	1 654,8	0,000303	0,000161
660	101 314,0	1 654,8	0,000303	0,000095
690	101 314,0	1 654,8	0,000303	0,000042
720	101 314,0	1 654,8	0,000303	0,000021

ZX10R 300

Дата: 19.10.2025

$L_i = 437,531325$ Дж/цикл

$p_i = 1756096,026840$ Па

$\eta_i = 0,594945$

$g_i = 0,165465$ кг/(кВт·год)