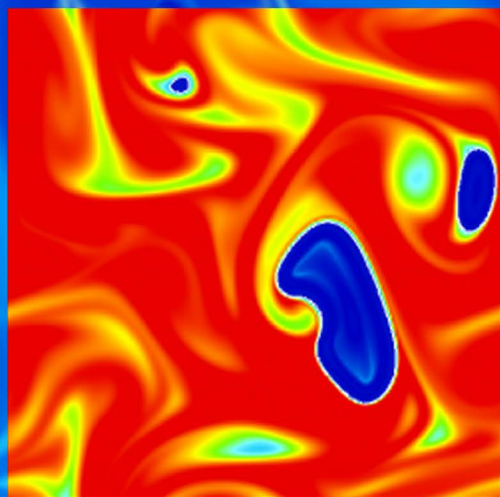


Петро Гащук, Сергій Нікіпчук

**ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ
У ДВИГУНАХ
швидкого внутрішнього
згоряння**



Петро ГАЩУК
Сергій НІКІПЧУК

**ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ У ДВИГУНАХ
швидкого внутрішнього згоряння**

***Теплотворення
й теплоспоживання
в двигуні
швидкого
внутрішнього
згоряння***

***Release and use of heat energy
in internal combustion engines***



Петро ГАЩУК, Сергій НІКІПЧУК

**Теплотворення
й теплоспоживання
в двигуні
швидкого
внутрішнього згоряння**

Київ
**КОНДОР**
2021

УДК 621.01+621.03

Г 24

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор *Олександр Вольченко*
(Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу);

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України *Ігор Кузьо*
(Національний університет «Львівська політехніка»);

доктор фізико-математичних наук, професор *Роман Тацій*
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

Порекомендували до друку

вчена рада Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
та вчена рада Національного університету «Львівська політехніка»

Гащук Петро, Нікіпчук Сергій

Теплотворення й теплоспоживання в двигуні швидкого внутрішнього згоряння: Монографія. — Київ: Видавничий дім «Кондор», 2021.— 324 с.— 140 іл., 11 табл.— Бібліогр.: 153 назви.

Г 24

Petro Hashchuk, Serhij Nikipchuk

Release and use of heat energy in internal combustion engines

ISBN

Розглядається hard-soft-технологія дослідження явищ теплотворення й тепловикористання у двигуні швидкого внутрішнього згоряння, в підваліні якої покладено принципи праксіологічності. Визнано, що подальший розвиток класичних підходів до моделювання робочих процесів у тепловому двигуні, які спираються суто чи здебільшого на аналітико-алгоритмічні описи, є практично неможливим. Тож запропоновано залучити в модель також і реальний робочий простір двигуна, системно приєднуючи його до віртуального, втіленого в програмно-алгоритмічному середовищі, і тим самим упродажуючи частину реальності в модель цієї ж реальності. За натурний робочий простір доречно взяти циліндр реального дослідницького двигуна, змонтованого на спеціальному випробному стенді.

Для наукових працівників, інженерів, аспірантів, студентів і курсантів закладів вищої освіти, пізнавальні інтереси яких мають технічний ухил.

УДК 621.01+621.03

ISBN

© Гащук П., Нікіпчук С., 2021

© Видавничий дім «Кондор», 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	11
ПЕРЕЛІК РИСУНКІВ І ТАБЛИЦЬ	13
ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ	22
1 РОБОЧА МАШИНА І ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	29
1.1 Загальні принципи оцінювання досконалості машин різного призначення	29
1.2 Двигун внутрішнього згоряння як об'єкт удосконалення	44
1.3 Зasadничі аспекти моделювання процесів у двигунах	92
1.4 Особливе значення двигуна швидкого внутрішнього згоряння ...	94
1.5 Енергетична ефективність як ознака досконалості двигуна внутрішнього згоряння	96
1.6 Підходи до моделювання внутрішньомоторних процесів у двигуні внутрішнього згоряння	99
1.7 Резюме	102
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПЕРЕБІГАЮТЬ В ЦИЛІНДРАХ ДВИГУНА	107
2.1 Існуючі термодинамічні моделі	107
2.2 Зміст найпоширеніших моделей	109
2.3 Двобонна модель робочого простору	111
2.4 Особливості модельних уявлень	114
2.5 Резюме	135

3 ІНСТРУМЕНТАРІЙ HARD-SOFT-ТЕХНОЛОГІЇ	
ДОСЛІДЖЕННЯ	137
3.1 Технологія дослідження робочого процесу в двигуні внутрішнього згорання. Натурно-модельний робочий простір двигуна.....	137
3.2 Матеріально-алгоритмічна модельна система	147
3.3 Найважливіші апаратурні засоби моделювання/симулювання.....	151
3.4 Резюме	162
4 ТЕПЛОТВОРЕННЯ У ДВИГУНІ ШВИДКОГО	
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	164
4.1 Теоретичні засади дослідження процесу теплотворення.....	164
4.2 Реальне теплотворення	166
4.3 Ідеальне теплотворення	167
4.4 Діаграми вигорання пального	171
4.5 Перебіг процесів теплотворення	174
4.6 Експонентне відображення процесів теплотворення	178
4.7 Особливості процесів теплотворення.....	183
4.8 Резюме	193
5 ТЕПЛОВІДДАЧА І ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ	196
5.1 Явище теплової взаємодії	196
5.2 Прості задачі теплоперенесення.....	202
5.3 Процес згорання	210
5.4 Тепловіддача та теплопередача в двигуні	217
5.5 Коефіцієнт тепловіддачі як емпіричний параметр	222
5.6 Коефіцієнт тепловіддачі як розмірний параметр безрозмірного співвідношення подібності	224
5.7 Резюме	245
6 ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ.....	247
6.1 Експериментальна інформація про тиск і температуру в циліндрі.....	247
6.2 Термодинамічна модель двигуна: засадничі співвідношення.....	249
6.3 Аналітичний опис теплотворення і теплоспоживання.....	253
6.4 Окремі різновиди зовнішньої теплопередачі.....	257
6.5 Внутрішній теплообмін.....	260
6.6 Режимні параметри.....	262
6.7 Резюме	264

7 ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВИГУНА В ТЕРМІНАХ ІДЕАЛЬНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЦИКЛІВ	266
7.1 Поняття елементарного термодинамічного циклу	266
7.2 Двигуни Міллера й Аткінсона.....	279
7.3 Про ефективність швидкого теплотворення	284
7.4 Порівняння ефективності циклів Отто й Аткінсона/Міллера	286
7.5 Регулювання тягових потенцій двигуна.....	292
7.6 Резюме.....	304
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	307
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	311

ПЕРЕДМОВА

У приводах практично всіх автономних робочих машин найрізноманітнішого призначення — тракторів/райдерів; різальних/рубальних/мийних/снігоприбиральних/підмітальних машин, садових дробарок, пил, кіс/косарок, мотокультиваторів/мотоблоків, електрогенераторів, мотопомп, дронів, гвинтокрилів, гібридних транспортних засобів, розміновувачів, мультифункційних машин, пожежно-рятувального устаткування тощо-тощо — застосовують теплові машини (двигуни) швидкого внутрішнього згоряння. Вони ж широко використовуються й на транспортних засобах. Найприроднішим, найзагальнішим і найоб'єктивнішим мірилом ефективності й досконалості хоч-якої робочої машини є її енерго(ексерго)ощадність за регламентованого рівня продуктивності. Енерго(ексерго)ощадність — це ще й запорука високого рівня екологічності машин. Під втратами енергії розуміють не буквально втрати як такі (енергія ж бо зникати не може), а так трактують ту частину енергії, що за формою чи/та параметрами стає непридатною для використання в конкретній системі чи для досягнення конкретної мети. По-справжньому можна втрачати тільки ексергію.

Оскільки суто механічний аспект енергоощадного/екологічного удосконалення техніки практично вичерпано, то досконалість робочої чи транспортної машини є сенс розглядати через призму досконалості власне привідної теплової машини. Теплові машини внутрішнього згоряння створюють значний хімічний (біологічний) і тепловий тиск на довкілля, сукупно спалюючи значну кількість палива й повітря за порівняно низької власної продуктивності.

Тож удосконалювати привідний двигун внутрішнього згорання доречно насамперед в сенсі підвищення ефективності енергоперетворення. Саме такого спрямування дослідження є надзвичайно актуальними.

Енергетична ефективність — чи не найважливіша ознака досконалості хоч якої мобільної техніки. А отже чи не єдиним способом розв'язання загальної проблеми енергоефективності двигуна внутрішнього згорання є підвищення якості згорання робочої суміші й ефективності теплоспоживання в його робочому просторі. Щоб у повній мірі дослідити процеси теплотворення, теплоспоживання, тепловіддачі необхідно мати можливість багатократного контрольованого їх відтворення. Через обмежені можливості використання вимірювальної техніки необхідно досліджувати теплові процеси, що перебігають в циліндрах двигунів, ще обов'язково аналітичними засобами.

Виявляється, що подальший розвиток класичних підходів до моделювання робочих процесів в тепловій машині, спираючись суто чи здебільшого на аналітико-алгоритмічні описи, практично цілком вичерпав себе. Тому природно виникає необхідність залучити в модель також і реальний робочий простір теплової машини, системно приєднуючи його до віртуального, втіленого в програмно-алгоритмічному середовищі, і тим самим впроваджуючи частину реальності в модель цієї ж реальності. Відтак виникають можливості істотно удосконалити технологію дослідження і оптимізації енергоефективності машин не за рахунок добування спеціальних емпіричних описів, а завдяки черпанню поточної інформації з реального інформаційного простору на засадах теорії подібності. При цьому з'являється також можливість істотно спростити аналітичну складову модельного відображення робочих процесів в машині, надаючи зазначеній технології ознак праксеологічності.

За об'єкт дослідження обрано теплову машину швидкого внутрішнього згорання, залишаючи поза увагою дуже привабливий довший час дизельний двигун. Світ все наполегливіше відмовляється від послуг саме дизеля, втрачаючи надію на доведення його до прийнятних в екологічному сенсі кондицій. Так поступають і автомобільні концерни, що виробляють «масові» автомобілі, і компанії, що пропонують автомобілі «преміум класу». Часом це робиться під безпосереднім тиском організацій, що борються за екологічно чисте майбутнє, часом це є рішенням владних структур — спонукане юридичними засобами чи мотивоване власним усвідомленням проблеми. Деякі компанії (зокрема Toyota), категорично відмовляючись від просування будь-яких нових «дизельних» технологій, цілком зосередилися на технології гібридів, в рамках яких, проте, двигун

внутрішнього згоряння (бензиновий, зрозуміло) все-дно обійматиме одне з чільних місць. Та водночас доречно підкреслити, що «здобутки дизеля» закарбувалися і в отто-двигуні.

Метою дослідження, основні результати яких викладено тут, були ідентифікація закономірностей перебігу і пошук можливостей підвищення ефективності процесів теплотворення/теплоспоживання/теплообміну в теплових двигунах швидкого внутрішнього згоряння, а відтак і загалом ефективності робочих чи транспортних машин з цими двигунами в приводі, засобами hard/soft-технології, що передбачає оперування водночас і натурним робочим простором двигуна, і віртуальним робочим простором у формі комп'ютерної його моделі.

Потрібної ефективності використовуваної моделі надає імітація в програмному середовищі взаємодії між собою і довкіллям двох зон, на які поділено модельний робочий простір двигуна. Двобазна модель протиставлена так званим багатозонним, у рамках яких завжди існує високий ризик виникнення майже неконтрольованих помилок і похибок — моделям, які потребують складного й трудомісткого інформаційного супроводу й інформаційного обслуговування. Саме у разі двобазного трактування модельного робочого простору стає можливим відмовитись від аналітичного контролю за хімічною рівновагою в робочому середовищі і не існує причин, які б зумовлювали речовинний обмін між зонами. А тому тепловіддачу у стінки робочого простору можна визначати за прикладом однозонної моделі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. Автомобільні двигуни. — Київ: Арістей, 2006. — 476 с.
2. Вибє И. И. Новое о рабочем цикле двигателя. — Москва: Машгиз, 1962. — 271 с.
3. Вибє И. И., Фарафонов М. Ф., Ставров А. П. Метод определения параметров кинетики процесса сгорания по характерным точкам индикаторной диаграммы и ее первой производной / Автомобили, тракторы и двигатели. Сборник научных трудов Челябинского политехнического института. — 1969. — № 75. — С. 148—158.
4. Водолажченко В. В., Куриц А. А., Симсон А. Э., Тарасов А. М., Поляков В. Н. Проектирование тепловозных двигателей. — Москва: Изд-во «Транспорт», 1972. — 224 с.
5. Гащук П. М. Енергія та упорядкований рух. — Львів: Українські технології, 2004. — 608 с.
6. Гащук П. Н. Оптимизация топливно-скоростных свойств автомобиля. — Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1987. — 168 с.
7. Гащук П. Н. Энергопреобразующие системы автомобиля: идентификация и анализ. — Харьков: РИО ХГАДТУ, 1998. — 272 с.
8. Гащук П. Н. Энергетическая эффективность автомобиля. — Львов: Свит, 1992. — 208 с.
9. Гащук П., Богачик Ю. Аналітичні засоби моделювання процесів теплотворення-теплоспоживання в двигуні з яскровим запалюванням на ялових режимах його роботи // Проектування, виробництво та експлуатація

автотранспортних засобів та автопоїздів. Праці Західного наукового центру Транспортної академії України. Т. 1. — Львів, 1995. — С. 34—51.

10. Гашук П., Богачик Ю. Особливості внутрішнього теплопереносу в двигуні з яскровим запаленням за різних навантажень // Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. Праці західного наукового центру Транспортної академії наук. Т. 2. — Львів, 1995. — С. 12—15.

11. Гашук П. М., Вайда І. Р., Нікіпчук С. В. Фазові переходи в речовинах. Нагромадження та перетворення енергії. — Львів: Українські технології, 2006. — 224 с.

12. Гашук П., Никипчук С. Аналитическая аппроксимация топливных характеристик автомобильного двигателя // Polska Akademia nauk oddział w Krakowie. Teza komisji naukowo-problemowej motoryzacji: konstrukcja, Badania, Eksploatacja, Technologia pojazdów samochodowych I silników sralinowych.— Zeszyt Nr 22.— Kraków, 2001.— S. 127—134.

13. Гашук П. М., Нікіпчук С. В. Застосування hard-soft-технології моделювання робочого процесу в двигуні внутрішнього згоряння / Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні технології розвитку автомобільного транспорту» (м. Харків: ТОВ «Видавництво «Форт», 16—19 жовтня 2018 р). — Харків: Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, Автомобільний факультет. — С. 259—261.

14. Гашук П. М., Нікіпчук С. В. Модельно-симуляційна технологія дослідження термодинамічних процесів у двигунах внутрішнього згоряння / 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. — Львів: Дослідно-видавничий центр Наукового товариства імені Шевченка, 18-19 травня 2017. — С. 93—95.

15. Гашук П. М., Нікіпчук С. В. Моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння // Збірник наукових праць «Пожежна безпека» ЛДУ БЖД. — № 33. — Львів, 2018. — С. 15—34. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.03.

16. Гашук П. М., Нікіпчук С. В. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння // Автомобільний транспорт. — № 42. — 2018. — С. 12—21. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.12.

17. Гашук П., Нікіпчук С. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння / Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Львів: ЛДУБЖД, 14 вересня 2018).

— Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності.
— С. 166.

18. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Стендово-аналітичні засоби моделювання теплових явищ, що перебігають у двигуні внутрішнього згоряння / Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців» (Харків: ТОВ «Видавництво «Форт», 19—20 жовтня 2017 р). — Харків: Харківський Національний автомобільно-дорожній університети, Автомобільний факультет. — С. 227—228.

19. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Теплотворення в двигуні швидкого внутрішнього згоряння // *Mechanics and Advanced Technologies*. — Київ, 2018. — Т. 82, № 1. — С. 92—99.

DOI: 10.20535/2521-1943.2018.82.125201.

20. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Hard-soft-технологія інформаційного супроводу процесу моделювання теплотворення/теплоспоживання в двигуні внутрішнього згоряння // Збірник наукових праць Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. — № 18. — Львів, 2018. — С. 6—22. DOI: 10.32447/20784643.18.2018.01.

21. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Hard-soft-технологія ідентифікації перебігу робочого процесу в двигуні внутрішнього згоряння / 14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 23 травня — 24 травня 2019 р.): Матеріали симпозіуму. — Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2019. — С. 63—65.

22. Гащук П. М., Нікіпчук С. В., Богачик Ю. О. Натурно-машинні засоби в моделюванні термодинамічних процесів, що перебігають у двигунах внутрішнього згоряння / Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. — № 354. — Львів, 1998. — С. 3—9.

23. Гащук П., Миськів Т., Нікіпчук С. Автомобільні двигуни. Тепловий та динамічний розрахунок. — Львів: Українські технології, 2006. — 144 с.

24. Гащук П. М., Сичевський М. І., Домінік А. М. Про зміст поняття «Коефіцієнт корисної дії автомобіля» // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. — Львів, 2016. — № 14. — С. 152—175.

25. Гончар Б. М. Уточненный способ расчета и построения индикаторной диаграммы двигателя // Труды Центрального научно-исследовательского института. — 1954. — Вып. 25. — С. 108—116.

26. Дьяченко Н. Х., Дашков С. Н., Мусатов В. С., Белов П. М., Будыко Ю. И. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания / Под ред. Н. Х. Дьяченко. — Москва — Ленинград: Машгиз, 1962. — 360 с.

27. Дьяченко Н. Х., Костин А. К., Пугачев Б. П. и др. Теория двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Н. Х. Дьяченко. — Ленинград: Машиностроение, 1974. — 552 с.
28. Зейлигер М. Двигатели Дизель повышенной мощности. Библиотека по двигателям внутреннего сгорания / Перевод с немецкого. — Москва: Московское академическое издательство, 1927. — 292 с.
29. Луканин В. Н., Морозов К. А., Хачиян А. С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / Под ред. В. Н. Луканина. — Москва: Высшая школа, 1995. — 368 с.
30. Мац З. З. Инженерная методика расчета процесса сгорания в дизеле // Двигателестроение, 1982. — № 9. — С. 16—18; 1983. — № 8. — С. 32—36.
31. Мелькумов Т. М. Теория быстроходного двигателя с самовоспламенением // Москва: Государственное издательство оборонной промышленности, 1953. — 408 с.
32. Нікіпчук С. Аналіз та оптимізація схем суміщення структурних елементів у системах охолодження автотранспортних двигунів / Дев'ятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Праці. (Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 20-22 травня 2009). — Львів: Львівський національний університет «Львівська політехніка». — С. 271—272.
33. Нікіпчук С. В. Визначення коефіцієнта теплопередачі в двигуні приводу пожежно-рятувального обладнання аналітичними засобами / Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Львів: ЛДУ БЖД, 20-21 жовтня 2016 р.) — Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. — С. 433—435.
34. Рвачов В. Л., Рвачов В. О. Экспериментальная математика: методология, проблемы, практика. — Київ: Знання, 1983. — 32 с.
35. Селезнев Ю. В. Выбор эффективного тепловыделения для однокамерных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. — 1971. — Вып. 14. — С. 30—35.
36. Селезнев Ю. В. Определение динамики тепловыделения в однокамерных дизелях через управляющие параметры // Двигатели внутреннего сгорания. — 1975. — Вып. 21. — С. 3—9.
37. Семенов Б. Н., Павлов Е. П., Копцев В. П. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. — Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. — 240 с.
38. Частухин В. И., Частухин В. В. Топливо и теория горения. — К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. — 223 с.

39. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — 344 с.

40. Abbaszadehmosayebi G., Ganippa L. Characterising Wiebe Equation for Heat Release Analysis based on Combustion Burn Factor (Ci) // *Fuel*. — 2014. — Vol. 119. — P. 301—307. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.006.

41. Adams Willi, Birsztejn Thomas, Kupe Joachim, Wilhelmi Herbert. Ein neu entwickeltes plasmastrahlzündsystem zur Verbrennung von magergemischen // *MTZ: Motortechn. Z.*, 1988. — 49, № 12, —S. 515—519.

42. Akansu S. O., Tangöz S., Kahraman N., İlhak M. İ., Açıkgöz S. Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2017. — Vol. 42, Issue 40. — P. 25781—25790. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.014.

43. Amsden A. A., Butler T. D., O'Rourke P. J., Remshaw J. D. KIVA: A Comprehensive Model for 2D and 3D Engine Simulation. Los Alamos National Laboratory // *SAE Int. Congress Ex.* — Detroit, 1985. — 16 p.

44. Annand W. Heat Transfer in The Cylinder of Reciprocating Internal Combustion Engines // *Thermodynamics and Fluid Mechanics Group*. — 1963. — Vol. 177. — № 36. — P. 973—996. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1963_177_069_02.

45. Barrere M. Les futurs combustibles pour l'aviation // *Aeronaut et astronaut*. — 1977. — 5, № 66. — P. 21—30.

46. Bajulaz R. US 4513568, IPC F 02 B 75/021. Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine. USA assignee. — № US06442799; app. 18.11.1982; pub. 30.04.1985. — 9 p.

47. Bajulaz R. US 4809511, IPC F 02 G 1/02. Internal Combustion Engine. USA assignee. — № US07059218; app. 08.06.1987; pub. 07.03.1989. — 12 p.

48. Bartlmä F. *Gasdynamik der Verbrennung*. — Wien/New York: Springer-Verlag, 1975. — XI, 247 s.

49. Bockeimann W., Graewert G., Burghardt H.-M. Untersuchung der Leerlaufqualität von Ottomotoren. // *MTZ: Motortechn. Z.* — 1990. — Teil 1. — 51, № 10. — S. 426—430.

50. Borg J. M., Alkidas A. C. On the application of Wiebe functions to simulate normal and knocking spark-ignition combustion // *International Journal of Vehicle Design*. — 2009. — Vol. 49, № 1—3. — P. 52—69.

51. Boulouchos K.; Papadopoulos S. Zur Modellbildung des motorischen Verbrennungsablaufes // *MTZ*. — 1984. — 38. — S. 21—26.

52. Bracco F. V. Modeling and diagnostics of combustion in spark-ignition engines // *ATA—Ingegneria automotoristica*. — 1988. — 41, №5. — P. 373—385.
53. Bracco F. V., Gupta H. C., Krishnamurthy L., Santavicca D. A., Steinberger R. L., Warshaw V. Two-phase, two-dimensional, unsteady combustion in internal combustion engines; theoretical-experimental results // *SAE Prepr.* — 1976. — № 760114. — 16 p.
54. Brandstätter W., Killmann I. Computersimulation der Strömung, Gemischbildung und Verbrennung in Motoren // *MTZ: Motortechn. Z.* — 1988. — 49, №5. — S. 177—178; 181—186.
55. Carnot S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.* — Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, 1878. — 102 p.
56. Chen Z., Konno M., Oguma M., Yanai T. Experimental study of CI natural-gas/DME homogeneous charge engine // *SAE Technical Paper Series*. — 2000. — № 2000-01-0329. — 10 p.
57. Clausius R. *Die mechanische Wärmetheorie. Band 1.* — 3 Auflage. — Braunschweig: Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, 1887. — XVI + 403 s.
58. Conklin J. C., Szybist J. P. A highly efficient six stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery. — *Energy*, 2010. — Vol. 35, Issue 4. — P. 1658—1664.
DOI: 10.1016/energy.2009.12.012.
59. Crower B. 2007/0022977 A1 US, MKI F01 B29/04. Method and apparatus for operating an internal combustion engine. — 2007. — P. 1—13.
60. Decan G., Broekaert S., Lucchini T., D'Errico G., Vierendeels J., Verhelst S. Evaluation of wall heat flux calculation methods for CFD simulations of an internal combustion engine under both motored and HCCI operation // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 232. — P. 451—461.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.214.
61. Dirk R. 2-Stroke Scavenging in Conventional and Minimally-Modified 4-Stroke Engines for Heavy Duty Applications at Low to Medium Speeds // *Inventions*. — 2019. — 4, 44. — P. 1—13.
DOI: 10.3390/inventions4030044.
62. Djafari V., Duflot J., Jean-Colas M. Etude sur le comportement a chaud des sables préenrobés / *Fonderie*. — 1974. — № 339. — P. 409—422.
63. Eichelberg G. Some New Investigations on Old Combustion Engine Problems // *Engineering*. — 1939. — P. 463—466.

64. Eyzat P., Guibet J. C. A New Look at Nitrogen Oxides Formation in Internal Combustion Engines // SAE-Paper. — 1968. — № 680124. — 20 p.

65. Fagundez J. L. S., Sari R. L., Martins M. E. S., Salau N. P. G. Comparative analysis of different heat transfer correlations in a two-zone combustion model applied on a SI engine fueled with wet ethanol // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 115. — P. 22—32.

DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.121.

66. Flowers D., Aceves S., Smith R. et al. HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling // SAE Technical Paper Series. — 2000. — № 2000-01-0328. — P. 1—13.

67. Gaballah I., Baranat H. Ein Beitrag zur Benzteilung und Entwicklung von Kraftfahrzeug—Kühlsystem // MTZ. — 1980. — 41, № 3, — S. 107—108; 111—112.

68. Ghojel J. I. Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research // International Journal of Engine Research. — 2010. — Vol. 11, № 4. — P. 297—312.

69. Griffin S. Method of operating gas engines / USPTO. — Somerset, 1889. — 412883. — P. 1—8.

70. Gronowicz J. Ochrona środowiska w transporcie lądowym. — Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, 1996. — 301 s.

71. Gröber H., Erk S., Grigull U. Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Dritte, neubearbeitete Auflage. — Berlin/Göttingen/ Heidelberg: Springer-Verlag, 1955. — VIII, 428 s.

72. Hampel R., Kurr D., Schefenacker H. Elektronisches Meßsystem zur digitalen Erfassung und Auswertung von Indikator diagrams // MTZ. — 1975. — 36, № 2. — S. 33—38.

73. Harigaya Y., Toda F., Ohayagi S., Tsuji H. Surface temperature and wall heat flux in a spark-ignition engine under knocking and non-knocking conditions // SAE Techn. Pap. Ser. — 1989. — № 891795. — P. 369—378.

74. Hashchuk P., Nikipchuk S. Development of praxeological principles to model/study heat generation and heat consumption processes in the engine of rapid internal combustion // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2019. — Vol 1, № 5 (97). — P. 54—65; 73—74.

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154409.

75. Hashchuk P., Nikipchuk S. General principles of hard-soft-technologies application to modelling of operation process in internal combustion engines // Proceedings of Odesa polytechnic university. — Odesa, 2018. — Issue 2 (55). — P. 34—48.

76. Hashchuk P., Nikipchuk S. Heat generation and heat consumption in engine of rapid internal combustion // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. — Lviv, 2018. — Vol. 4, № 1. — P. 160—174.
77. Herweg R., Begleris Ph., Zettlits A., Ziegler G.F. W. Flow field effects on flame kernel formation in a spark-ignition engine // SAE Techn. Pap. Ser. — 1988. — № 881639. — 21 p.
78. Hoche A. Rechnerische und experimentelle Untersuchung von Elementen der Innenvorgänge im Dieselmotor // KFT. — 1988. — 11. — P. 332—335.
79. Hohenberg G. Experimentelle Erfassung der Wandwärme von Kolbenmotoren / Habilitationsschrift. — TU Graz. — 1980.
80. Hohlbaum B. Beitrag zur rechnerischen Untersuchung der Stickstoffoxid-Bildung schnelllaufender Hochleistungsdieselmotoren / Dissertation. — TH Karlsruhe. — 1992.
81. Hu S., Wang H., Niu X., Li X., Wang Y. Automatic calibration algorithm of 0-D combustion model applied to DICI diesel engine // Applied Thermal Engineering. — 2018. — Vol. 130. — P. 331—342. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.013.
82. Hu S., Wang H., Yang C., Wang Y. Burnt fraction sensitivity analysis and 0-D modelling of common rail diesel engine using Wiebe function // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 115. — P. 170—177. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.080.
83. Huang W.-M., Greif R., Vosen S. R. The effects of pressure and temperature on heat transfer during flame quenching // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 872106. — 11 p.
84. Huber E, Schey W., Vogt R. Beitrag zur Berechnung der Stickoxidbildung im Dieselmotor // MTZ. — 1978. — 39, № 5. — P. 235—237.
85. Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions. — London: IMechE, 2013. — 254 p.
86. Ishida M., Ueki H., Yoshimura Y., Matsumura, N. Studies on Combustion and Exhaust Emissions in a High Speed DI Diesel Engine // Society of Automotive Engineers Paper. — 2000. — 901614. — P. 1—7.
87. Isshiki Naotsugu, Nishiwaki Nobuhiko. Basic study on inside convective heat transfer of internal combustion engines // Heat Transfer. — 1974. — Vol. 2. Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf. Tokyo, 1974, Tokyo s.a., — P. 344—348.
88. Janhunen T. T. HCCI-Combustion in the Z Engine // SAE Technical Paper Series. — 2012. — № 2012-01-1573. — P. 1—16.

89. Kandari S., Gupta I. Six Stroke Engine // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). — 2013. — Vol. 2, Is. 10. — P. 884—889.

90. Karmalkar C., Raut V. Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. — 2014. — Vol. 2, Issue 1. — P. 1—4.

DOI: 10.11648/j.ijmea.20140201.11.

91. Kéromnès A., Delaporte B., Schmitz G., Le Moyne L. Development and validation of a 5 stroke engine for range extenders application // Energy Conversion and Management. — 2014. — 82. — P. 259—267.

92. Kleinschmidt W. Untersuchung des Arbeitsprozesses und der NO-, NO₂- und CO-Bildung in Ottomotoren / Dissertation. — RWTH Aachen. — 1974.

93. Kong S. C. A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics // Fuel. — 2007. — № 86. — P. 1483—1489.

94. König H. C. Thermodynamische und reaktionskinetische Analyse der Verbrennung im Ottomotor / Dissertation. — TU Braunschweig. — 1972.

95. Kraemer St. Untersuchung zur Gemischbildung, Entflammung und Verbrennung beim Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung Fortschr. Ber. VDI Reihe. — Düsseldorf: VDI Verlag, 1998. — 12, № 353. — 116 s.

96. Kraftfahrzeugmotoren: Auslegung und Konstruktion / Herausgegeben von Volkmar Küntscher. — Berlin: Verlag Technik, 1989. — 720 s.

97. Kraßnig G. Die Berechnung der Stickoxidbildung im Dieselmotor / Habilitationsschrift. — TU Graz. — 1976.

98. Lavoie G. A., Heywood J. B., Keck J. C. Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines / Combustion Science and Technology. — 1970. — Vol. 1. — P. 313—326.

99. Liu F. CFD-study on hydrogen engine mixture formation and combustion. — Göttingen: Cuvillier Verlag, 2004. — 123 p.

100. Lorenz M., Müller A., Prescher K., Strehlow K. Ladungsbewegung und Verbrennungsablauf beim Ottomotor // MTZ: Motortechn. Z. — 1989. — 50, № 10. — P. 492—496.

101. Makheeda D. A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). — 2015. — Vol. 12. — P. 7—11.

102. Mallog J., Kluting M.. Einsatz moderner Meßverfahren zur Analyse und Optimierung der ottomotorischen Verbrennung // MTZ: Motortechn. Z. — 1989. — 50, № 6. — P. 275—279.

103. Meeks E., Ando H., Chou C.-P., Dean A. M., Hodgson D., Koshi M., Lengyel I., Maas U., Naik C. V., Puduppakkam K.V., Reitz R., Wang C. and Westbrook C. K. New modeling approaches using detailed kinetics for advanced engines / In Proc. 7th Int. Conf. on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems. — COMODIA, 2008. — P. 469—474.

104. Meinhold T. F. Liquid floumeters // Plant. Eng. — 1984. — 38, № 28. — P. 46—60.

105. Merkisz J. Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. — Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995. — 367 s.

106. Mohandas G., Desai-Patil V. Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels // SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). — 2015. — Vol. 2, Issue 10. — P. 19—24.

DOI: 10.14445/23488360/IJME-V2I10P104.

107. Möhlenkamp H.. Zur Genauigkeit der Brenngesetzrechnung eines Dieselmotors mit nichtunterteiltem Brennraum // MTZ. — 1976. — 37, № 7—8. — P. 285—291.

108. Musu E., Rossi R., Gentili, R. and Reitz, R. D. Clean Diesel Combustion by means of the HCPC Concept // SAE paper 2010-01-1256. — SAE Int. J. Engines, 2010. — Vol. 3, № 1. — P. 964—981.

109. Nagase K., Funatsu K. Spectroscopic analysis of diesel combustion flame by means of streak camera // SAE Techn. Pap. Ser. — 1988. — № 881226. — P. 1—9.

110. Naik C. V., Puduppakkam K., Wang C., Kottalam J., Liang L., Hodgson D. and Meeks E. Applying detailed kinetics to realistic engine simulation: The surrogate blend optimizer and mechanism reduction strategies // SAE International Journal of Engines. — 2010. — Vol. 3, № 1. — P. 241—259.

111. Newman L. G. Five stroke internal combustion engine / Patent US6776144B1. — USA; Aug. 17, 2004.

112. Ninic N., Grljušić M. and Jelic M. Decomposition method as a new type of second law analysis of the combustion process of internal combustion engines // International Journal of Exergy. — 2012. — Vol. 10, № 1, — P. 1—20.

113. Noga M., Sendyka B. Determination of the Theoretical and Total Efficiency of the Five-Stroke SI Engine // International Journal of Automotive Technology. — 26 November 2014. — 15(7). — P. 1083—1089.

114. Noga M., Sendyka B. New Design of the five-stroke engine // Journal of KONES Powertrain and Transport. — 2013. — 20 (1). — P. 239—246.

115. Nußelt W. Der Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. — Heft 264. Berlin: Springer-Verlag, 1923.

116. Oppenheim A. K. Quest for controlled combustion engines // SAE Techn. Pap. Ser. 99. — 1988. — № 880572, — 8 p.

117. Osborne R., Stokes J., Ceccarini D., Jackson N., Lake T., Joyce M., Visser S., Miche N., Begg S., Heikal M., Kalian N., Zhao H. and Ma T. The 2/4SIGHT Project — Development of a Multi-Cylinder Two-Stroke/Four-Stroke Switching Gasoline Engine // JSAE Paper 20085400 and JSAE Proceedings. — Yokohama, Japan, May 2008. — № 79—08. — P. 11—16.

118. Palanivendhan M. Modi Hitesh and Bansal Garvit Five Stroke Internal Combustion Engine // International Journal of Control Theory and Applications. — 2016. — 9(13). — P. 5855—5862.

119. Papadopoulos S. Reduktion der Stickoxidemissionen des direkteinspritzenden Dieselmotors durch Dieselölwasseremulsionen bzw. Wassereinspritzung / Dissertation. — ETH Zürich. — 1987.

120. Pattas K., Haefner G. Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung // MTZ. — 1973. — 34, № 12. — P. 397—404.

121. Pfalum W. Der Wärmeübergang bei Dieselmotoren mit und ohne Aufladung // Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. — Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag, 1960. — Band 54. — S. 39—64.

122. Pflaum W.; Mollenhauer K. Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine. — Wien, New York: Springer-Verlag, 1977. — 359 s.

123. Pischinger A. Zur Frage der Wärmebelastung in Dieselmotoren // MTZ. — 1955. — № 15. — S. 181—186.

124. Pischinger R.; Kraßnig G.; Taučar, G.; Sams, T. Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. — Wien, New York: Springer-Verlag, 1989.

125. Prescher K. Methoden zur thermodynamischen Analyse der Verbrennungsvorgänge in Ottomotoren. — Stuttgart: Habilitationsschrift, 1984.

126. Ramchandani M., Whitehouse N. D. Heat transfer in a piston of a four stroke diesel engine // SAE Prepr. — 1976. — № 760007. — 9 p.

127. Rankine W. J. M. A manual applied mechanics. — 6 ed. — London: Charles Griffin and company, 1872. — XVI + 648 p.

128. Rebhan M., Stokes J. Two-stroke/four-stroke multi-cylinder gasoline engine for downsizing applications // MTZ Worldwide. — 2009. — Volume 70, Issue 4. — P. 40—45. DOI:10.1007/BF03226944.

129. Remboski D. I., Rhee S. L., Martin J. K. An optical sensor for spark-ignition engine combustion analysis and control // SAE Techn. Pap. Ser. — 1989. — № 890159. — 14 p.

130. Schmitz G. Five-stroke internal combustion engine / Patent US6553977B2. — USA. — April 29, 2003.

131. Schröder A. Vorschlag einer Methode zur Berechnung der Stickoxid-Emission von Dieselmotoren / Dissertation. — TU Braunschweig. — 1975.

132. Seifert H. Erfahrungen mit einem mathematischen Modell zur Simulation von Arbeitsverfahren in Verbrennungsmotoren // MTZ. — 1978. — 39, № 12. — S. 567—572.

133. Shaded S. M., Chiu W. S., Yumlu V. S. A Preliminary Model for the Formation of Nitric Oxide in Direct Injection Diesel Engines and its Application in Parametric Studies // SAE Technical Paper. — 1973. — № 730083. — 14 p. DOI: 10.4271/730083.

134. Sitkei K. Beitrag zur Theorie der Wärmeüberganges im Motor // Konstruktion. — 1962. — № 14. — S. 67—71.

135. Self S. A., Whitelaw J. H. Laser anemometry for combustion research // Combust. Sci. and Technol. — 1976. — 13, № 1-6. — P. 171—197. Discuss., 197.

136. Spicher U., Krebs R. Optical fiber technique as a tool to improve combustion efficiency // SAE Techn. Pap. Ser. — 1990. — № 902138, — P. 1—12.

137. Stas Marek, Wajand Jan. Bestimmung der Vibe-Parameter für den Zweiphasigen Brennverlauf in Direkteinspritz-Dieselmotoren // MTZ: Motortechn. Z. — 1988. — 49, № 7—8. — P. 289—293.

138. Takagi H., Ohno T., Asanuma T. Temperature measurements of combustion gas in a spark ignition engine by infrared monochromatic pyrometry // SAE Techn. Pap. Ser. — 1990. — № 900483. — P. 1—9.

139. Tiainen J., Saarinen A., Gronlund T., Larimi M. Novel Two-Stroke Engine Concept, Feasibility Study // SAE Technical Paper Series. — 2003. — № 2003-01-3211. — P. 1—15.

140. Thiemann W. Verfahren zur genauen Zylinderdruckmessung an Verbrennungsmotoren — Teil 1 // MTZ: Motortechn. Z. — 1989. — 50, № 2. — P. 81—84; 87—88.

141. Thiemann W. Verfahren zur genauen Zylinderdruckmessung an Verbrennungsmotoren — Teil 2 // MTZ: Motortechn. Z. — 1989. — 50, № 3. — P. 129—134.

142. Thring R. H. The effects of varying combustion rate in spark ignited engines // SAE Techn. Pap. Ser. — 1979. — № 790387. — 11 p.

143. Tisza L. Generalized Thermodynamics. — Cambridge (Massachusetts). — London (England): The M.I.T. Press, 1966. — 384 p.

144. Wiebe I. I. Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren. — Berlin: VEB-Verlag Technik, 1970. — 286 s.

145. Woschni G. Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren // MTZ. — 1970. — № 31. — S. 491—499.

146. Woschni G., Flieger J. Experimentelle Bestimmung des örtlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten im Ottomotor // MTZ, Motortechnische Zeitschrift. — 1981. — 42, H. 6. — S. 229—234.

147. Woschni G., Kolesa K., Bergbauer F., Huber K. Einfluss von Brennraumisolierungen auf dem Kraftstoffverbrauch und die Wärmeströme bei Dieselmotoren // MTZ: Motortechn. Z. — 1988. — 49, № 7—8. — S. 281—285.

148. Wrona R. Rechenmodell zur elektronischen Berechnung der Kenngrößen eines mit Schichtladung betriebenen Ottomotors // MTZ. — 1974. — № 35. — S. 8—13.

149. Yao M., Chen Z., Zheng Z. et al. Effect of EGR on HCCI Combustion Fuelled with Dimethyl Ether (DME) and Methanol Dual-Fuels // SAE Technical Paper Series. — 2005. — № 2005-01-3730. — P. 1—8.

150. Yeliana Y., Cooney C., Worm J., Michalek D. J., Naber J. D. Estimation of double-Wiebe function parameters using least square method for burn durations of ethanol-gasoline blends in spark ignition engine over variable compression ratios and EGR levels // Applied Thermal Engineering. — 2011. — Vol. 31, Issue 14-15. — P. 2213—2220.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.040.

151. Yıldız M., Albayrak Çeper B. Zero-dimensional single zone engine modeling of an SI engine fuelled with methane and methane-hydrogen blend using single and double Wiebe Function: A comparative study // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42, Issue 40. — P. 25756—25765. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.016.

152. Zheng Z., Yao M., Chen Z. et al. Experimental Study on HCCI Combustion of Dimethyl Ether (DME). Methanol Dual-Fuel // SAE Technical Paper Series. — 2004. — № 2004-01-2993. — P. 1—9.

153. Zhou Y., Hariharan D., Yang R., Mamalis S., Lawler B. A predictive 0-D HCCI combustion model for ethanol, natural gas, gasoline, and primary reference fuel blends // Fuel. — 2019. — Vol. 237. — P. 658—675.
DOI: 10.1016/j.fuel.2018.10.041.

Наукове видання

Петро ГАЩУК, Сергій НІКІПЧУК

**Теплотворення й теплоспоживання в двигуні
швидкого внутрішнього згорання**

Монографія

Керівник видавничих проєктів: Ястребов А.О.
Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 14.12.2020 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. аркушів — 20,50.
Обл.-вид. аркушів — 19,06.
Наклад 300 прим.

ТОВ «Видавничий дім «КОНДОР»»
Свідоцтво серія ДК № 5352 від 23.05.2017 р.
03067, м. Київ, вул. Гарматна, 29/31
Тел./факс: (044) 408-76-17, 408-76-25
www.condor-books.com.ua