

# Метод експертної оцінки технічного стану циліндро-поршневої групи автомобільного двигуна після гідроудару

Хрулев О. Е.<sup>1</sup>, Сараєв О. В.<sup>2</sup>, Сараєва І. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Міжнародне моторне бюро, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 26.04.2024. Прийнято: 29.05.2024. Опубліковано: 11.06.2024. Відкритий доступ: СС BY 4.0.

**Анотація.** У роботі досліджується термогазодинамічний процес у циліндрі двигуна внутрішнього згорання в режимі холодного прокручування при вимірюванні компресії. Для розв'язання виявлених проблем розроблено математичну модель термогазодинамічного процесу в циліндрі при холодному прокручуванні в процесі вимірювання компресії в циліндрі. На відміну від наявних моделей покроково описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску, витоку повітря через пару деталей і теплообмін зі стінками. За допомогою моделювання знайдено основні закономірності зміни компресії від режимів, характеру пошкодження сполучених деталей клапанного механізму та циліндро-поршневої групи, включаючи деформацію шатуна при гідроударі від потрапляння рідини в циліндр. За результатами дослідження зроблено висновок, що властивості моделі роблять її застосування ефективним при діагностиці та моніторингу технічного стану двигунів в експлуатації.

**Ключові слова:** автомобіль, двигун, холодне прокручування, холодний старт, компресія, гідроудар, моделювання.

## Вступ

Аналіз різних моделей та порівняння відомих даних показали, що залишаються не вирішені до кінця проблеми побудови математичних моделей робочого циклу двигуна, а переважна більшість практичних даних та рекомендацій щодо вимірювання компресії в циліндрі заснована на емпіричних знаннях, численних експериментах та тестах. Відповідно до цього виникає потреба в розрахункових моделях процесу вимірювання компресії та їх теоретичному обґрунтуванні, особливо при експлуатаційному пошкодженні двигуна в результаті гідроудару.

## Аналіз публікацій

Відомо, що вимір максимального тиску – компресії, в циліндрах двигуна внутрішнього згорання є одним із поширених методів діагностики технічного стану та визначення причин несправності [1, 2]. Ця перевірка зазвичай застосовується на попередньому етапі досліджень, оскільки не вимагає демонтажу великої кількості елементів двигуна. Тим самим

вимір компресії є неруйнівним методом контролю технічного стану, у якому об'єкт дослідження повністю зберігає свої функції. Ця властивість методу має важливе значення при деяких видах досліджень, наприклад, при автотехнічній експертизі.

Іншою безумовною перевагою вимірювання компресії є простота та дешевизна самого вимірювального приладу – компресометра, а також простота алгоритму застосування [3, 4]. В результаті метод отримав надзвичайно широке поширення на практиці як один із найбільш універсальних методів діагностики [5, 6], а величина максимального тиску в циліндрі увійшла практично у всі сервісні та ремонтні керівництва більшості марок та моделей автомобілів [4].

Інша проблема, яка потребує детального аналізу діаграми зміни тиску в циліндрі в режимі холодного прокручування двигуна (без згорання палива), пов'язана з визначенням характеристик холодного старту [7]. Моделювання запуску дозволяє оцінити пускові властивості двигуна, особливо в умовах низьких температур. Це завдання близьке до завдання

вимірювання компресії. Але вона має на меті не діагностику технічного стану конкретного двигуна в експлуатації, а найчастіше конструкторські роботи з поліпшення пускових характеристик двигуна [8], визначення пускової подачі палива [9], оцінку шкідливих викидів і т.д. [10].

Разом з тим, переважна більшість практичних даних та рекомендацій щодо застосування розглянутого методу побудовано на емпіричних знаннях, численних експериментах та тестах [11, 12]. Споживачеві пропонується вірити рекомендаціям, які зазвичай пов'язують величину падіння компресії від якогось «нормального» рівня з конкретним видом несправності, ґрунтуючись на статистичних даних [13, 14]. При цьому перевірити ту чи іншу цифру, рекомендацію чи припущення про зв'язок результату вимірювання з несправністю, а також скоригувати отримані дані відповідно до своїх умов споживач не може, оскільки не має широко відомих і визнаних моделей та методів розрахункової оцінки. Ті ж моделі, які можна було б використовувати для отримання шуканих закономірностей, або побудовані на спрощених моделях політропних процесів [15] або мають обмеження [16, 17], які не дозволяють моделювати процес холодного прокручування без згорання [18].

Водночас, моделювання може бути важливим для практики через особливості конструкції досліджуваного двигуна, які можуть впливати на зміну величини компресії при різних експлуатаційних пошкодженнях. Однак, кількісні оцінки та, тим більше перевірки тих чи інших даних, пов'язаних з величиною компресії, надзвичайно затратні, оскільки вимагають експериментальних досліджень великого обсягу та складності. Крім цього, у відомих джерелах немає жодних рекомендацій щодо діагностики гідроудару та деформації шатуна при попаданні рідини в циліндр [19], зокрема, за допомогою вимірювання компресії. Звідси виникає потреба у розрахункових моделях процесу вимірювання компресії та їх теоретичному обґрунтуванні.

### Мета та постановка задачі

Дослідження робочого процесу в циліндрі двигуна внутрішнього згорання при холодному прокручуванні та одержання кількісних характеристик компресії при різних експлуатаційних ушкодженнях.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити математичну модель процесу в циліндрі при холодному прокручуванні двигуна;

– провести моделювання на різних режимах та при різному стані циліндро-поршневої групи та клапанного механізму, порівняти отримані результати з експериментальними даними;

– виконати аналіз отриманих результатів, визначити загальні закономірності, що пов'язують величину компресії з різними видами ушкоджень деталей двигуна.

### Математична модель процесу в циліндрі при холодному прокручуванні двигуна

Для виведення розрахункових рівнянь розглянемо схему циліндра (Рис. 1).

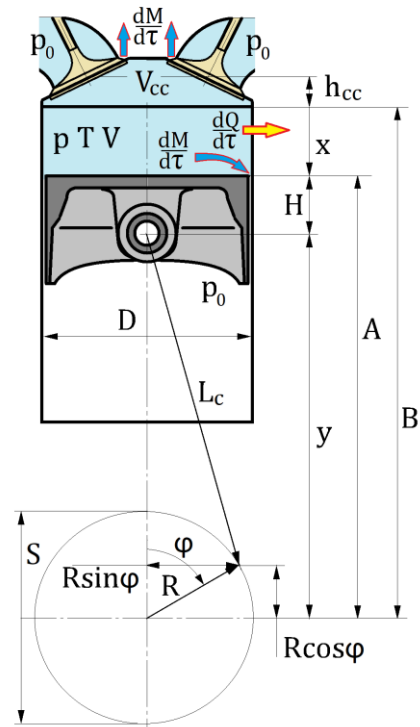


Рис. 1. Розрахункова схема процесу в циліндрі при холодному прокручуванні

З першого закону термодинаміки [20, 21], записаного для циліндра, випливає:

$$dU = dQ - dL + idM, \quad (1)$$

де  $dU$  – зміна внутрішньої енергії повітря у циліндрі;  $dQ$  – кількість тепла, що підводиться (+) або відводиться (-);  $L$  – робота повітря;  $i = C_p T$  – ентальпія повітря;  $dM$  – зміна маси повітря у циліндрі з допомогою припливу в циліндр (+) чи витоків з циліндра (-).

З рівняння стану ідеального газу шляхом диференціювання отримаємо:

$$MC_V dT + C_V T dM =$$

$$= dQ - \frac{MRT}{V} dV + C_p T dM, \quad (2)$$

де  $p$ ,  $T$  – тиск та температура в циліндрі;  $V$  – об'єм газу в циліндрі, який визначається положенням  $x$  поршня від верхньої мертвої точки [22];  $R$  – газова стала;  $C_V$ ,  $C_p$  – теплоємності при постійному тиску та об'ємі.

Тоді, якщо в рівняннях (1) і (2) взяти похідну за часом  $d\tau$ , то шляхом подальших перетворень можна отримати математичну модель досліджуваного процесу – систему диференціальних рівнянь 1-го порядку, дозволених щодо похідної, як [23, 24]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \frac{(\gamma-1)}{x+h_{cc}} T \left[ -\frac{dx}{d\tau} + \frac{RT}{pF_p} \left( \frac{dM}{d\tau} + \frac{1}{RT} \frac{dQ}{d\tau} \right) \right] \\ \frac{dp}{d\tau} &= \frac{\gamma}{x+h_{cc}} p \left[ -\frac{dx}{d\tau} + \frac{RT}{pF_p} \left( \frac{dM}{d\tau} + \frac{\gamma-1}{\gamma RT} \frac{dQ}{d\tau} \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

де зміна маси повітря в циліндрі визначається витратою повітря через клапани та місця витоків [25, 26], а втрати тепла можуть бути розраховані за відомою формулою Вошні [15].

Система (3) розв'язується чисельно з початковими умовами [27]: при  $\tau=0, \varphi=0$ ,  $x=0, T=T_0, p=p_0$  де параметри з нульовим індексом відповідають довікілю. Для розв'язання було використано метод Рунге-Кутта 2-го порядку (модифікований метод Ейлера) [28].

Налагодження моделі та алгоритму проводилося у програмі Excel. Крок по куту задавався з умови 1000 точок за 1 цикл (2 обороти колінчастого валу), що при частоті обертання 300 хв<sup>-1</sup> відповідало кроку часу 0,0004 с. Вибір кроку був зумовлений тим, що його зменшення не призводило до зміни точності розрахунку, тоді як збільшення викликало появу та посилення нестійкості рішення при впуску та випуску.

### Результати моделювання при різному стані циліндро-поршневої групи та клапанного механізму, порівняння з експериментальними даними

На рис. 2. представлені результати моделювання циклу холодного прокручування двигуна з витокем повітря, який заданий за допомогою налаштування моделі шляхом порівняння

одержуваної величини максимальної компресії з відомими експериментальними даними.

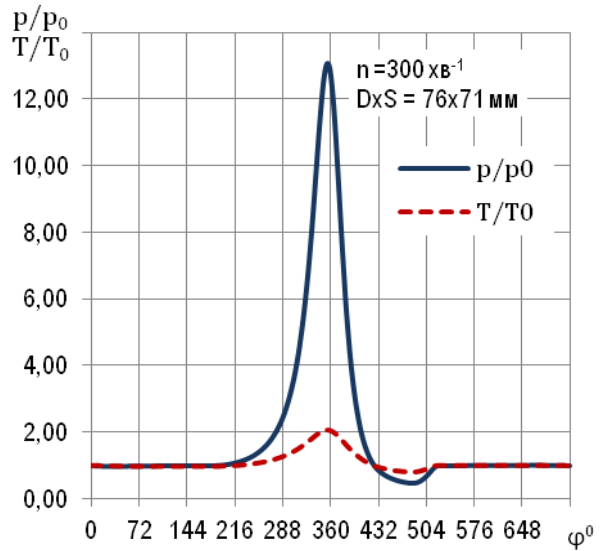


Рис. 2. Результати моделювання відносного тиску і температури в циліндрі при заданому витокі через поршневі кільця (значення умовного зазору між поршневим кільцем і циліндром  $\lambda_v=0,028$  мм було підібрано з умови відповідності величини компресії експериментальним даним [14])

Тестове моделювання дозволило встановити, що з заданої геометрії та температури двигуна 50<sup>0</sup>C теплові втрати, розраховані за формулою Вошні, викликають зниження компресії з 1,21 до 1,11 МПа, тобто приблизно 8%. Водночас згідно з системою рівнянь (3), дія теплових втрат і витоків на параметри газу в циліндрі відбувається в ту саму сторону. Так, при підвищенні тиску витоків з циліндра супроводжуються втратами теплоти нагрітим повітрям у стінки та навпаки, при течії повітря в циліндр до нього підводиться тепло від нагрітих стінок. У зв'язку з цим у подальших розрахунках теплові втрати не враховувалися, а їх вплив на процес компенсувався відповідним збільшенням площі витоків повітря з циліндра.

Для верифікації моделі використано експериментальні дані [14], отримані при випробуваннях великої кількості двигунів з різними несправностями. У процесі експериментів вироблялося вимір миттєвого тиску в циліндрі за часом за допомогою тензодатчика, сигнал якого після перетворення записувався в пам'яті комп'ютера.

На рис. 3 представлені приклади діаграм одного з досліджених типів двигунів, отримані під час тестування різних автомобілів. Ос-

новні дані двигуна: діаметр циліндра  $\times$  хід поршня – 76 $\times$ 71 мм, ступінь стиснення 9,9, кількість клапанів у головці циліндрів – 2 (впуск 37 мм та випуск 32 мм), фази впуску –

відкриття за 24° до верхньої мертвої точки (ВМТ), закриття 60° після нижньої мертвої точки (НМТ), фази випуску відкриття за 54° до НМТ, закриття 24° після ВМТ.

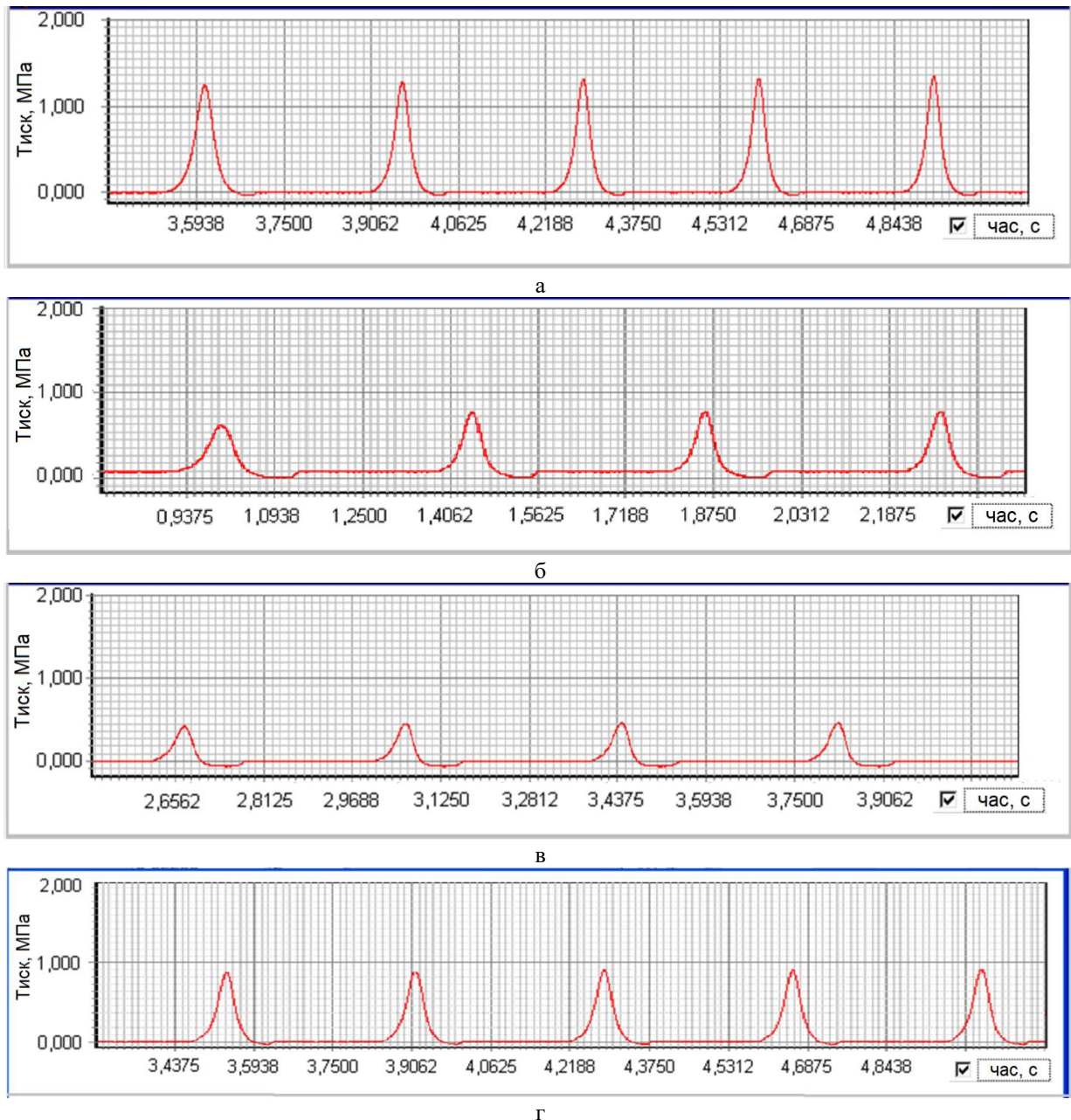


Рис. 3. Діаграми тиску в циліндрі, отримані при випробуваннях одного типу двигуна [14]: а – циліндро-поршнева група та клапанний механізм у нормальному стані; б – сильний знос поршневих кілець; в – негерметичність сполучення клапана з сідлом; г – падіння тиску внаслідок гідродару та деформації шатуна

Привертає увагу падіння компресії та збільшення характерної компенсаційної кишені за наявності несправностей, що збільшують виток з циліндра. Водночас в одному з тестів був виявлений двигун з пошкодженням шатуна при гідродарі. Таке пошкодження не викликає помітного збільшення виток, що можна бачити на діаграмі рис. 3г за малими розмірами компенсаційної кишені.

Отримані за допомогою моделювання зазначеного двигуна діаграми холодного прокручування показують загалом задовільний збіг з експериментом, що можна бачити на рис. 4.

Помітна відповідність отриманих кривих (рис. 4а та рис. 4б) експериментальним діаграмам, представленим на рис. 3а та рис. 3в відповідно, як за формою, так і кількісно. Од-

нак найбільш важливим є те, що збіг отримано не тільки формою кривої в зоні підвищення тиску, але і формою і розмірами компенсаційної кишені.

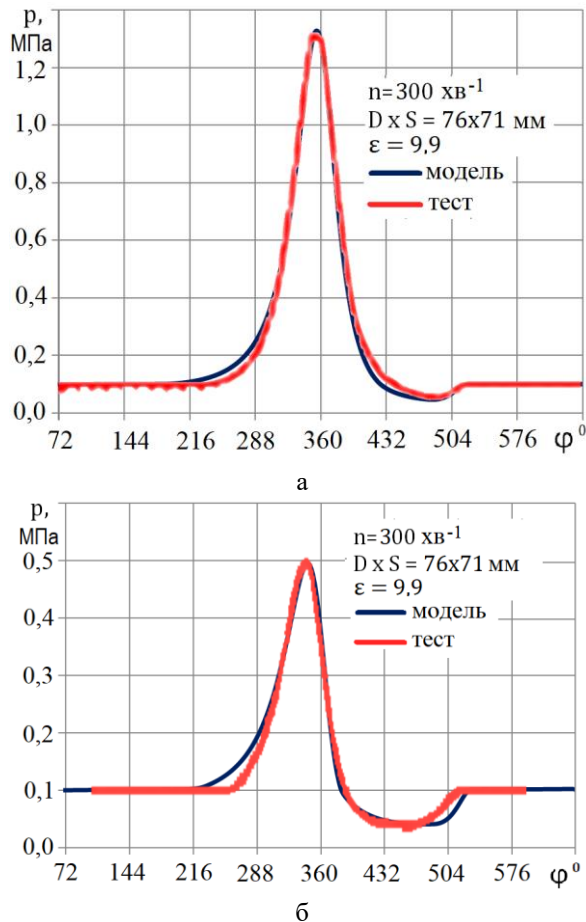


Рис. 4. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними: а – за нормального стану двигуна (діаграма а на рис. 3а); б – при негерметичності сполучення клапана з сідлом (діаграма на рис. 3в)

З аналізу наведених на рис. 2-4 кривих випливає, що розмір кишені фактично залежить від витоку повітря з циліндра при підвищеному тиску (очевидно, за повної відсутності витоку і теплових втрат жодної компенсаційної кишені не утворюється). Отриманий результат означає, що модель дає правильний опис не тільки процесів впуску-випуску та стиснення-розширення, а й витоку з циліндра при підвищеному тиску. Це дозволяє застосувати модель для дослідження характеру зміни діаграми холодного прокручування при будь-яких пошкодженнях, у тому числі не супроводжуються збільшенням витоку повітря з циліндра. Зокрема, за допомогою моделі з'являється можливість передбачити характер зміни діаграми холодного прокручування після гід-

роудару [29], коли максимальний тиск в циліндрі може бути значно знижений не в результаті витоку, а через деформацію (осьового стиснення) шатуна і падіння геометричного ступеня стиснення.

І дійсно, моделювання показує (рис. 5), що гідроудар у загальному випадку викликає падіння тиску в циліндрі, але при цьому виді ушкодження не відбувається розширення компенсаційної кишені. Тобто, відмінність діаграми тиску в циліндрі з деформованим шатуном від циліндра в нормальному стані спостерігається тільки у верхній частині діаграми, у той час, як при будь-якому пошкодженні, пов'язаному з витоку з циліндра, глибина та ширина кишені помітно збільшуються (рис. 5).

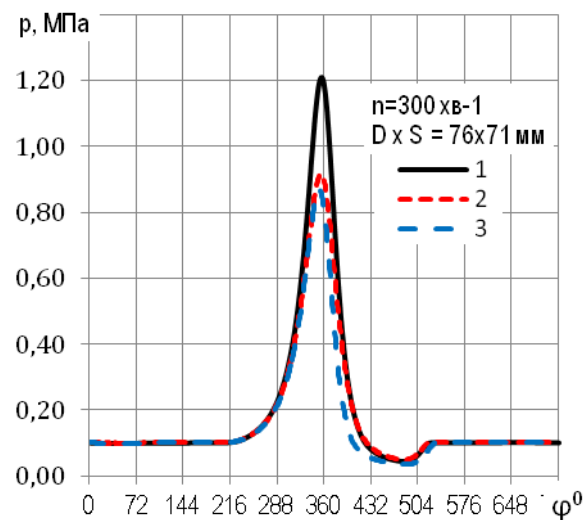


Рис. 5. Моделювання впливу пошкоджень двигуна на діаграму тиску в циліндрі при холодному прокручуванні: 1 – двигун у нормальному стані (рис. 3а); 2 – шатун, деформований на 2,6 мм після гідроудару (рис. 3г); 3 – знос поршневих кілець та циліндра (рис. 3б)

Це ключова інформація для діагностики даного виду ушкодження. Накладення експериментально отриманої діаграми (рис. 3г) на розрахункову діаграму (рис. 6) як показує хороше відповідність результатів моделювання досвідченим даним, і навіть дозволяє знайти величину деформації шатуна, відповідну компресії в ушкодженному циліндрі. У такому випадку (рис. 6) практичний збіг розрахункової та експериментальної (рис. 3в) діаграм спостерігалось при завданні з розрахунку деформації (укорочення) шатуна в діапазоні 2,6-2,7 мм.

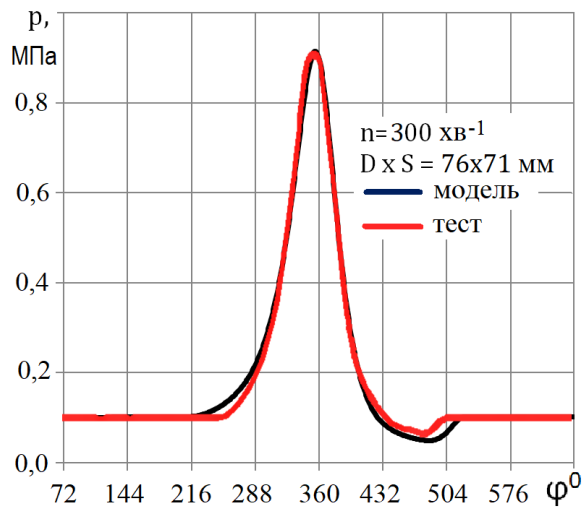


Рис. 6. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними при гідроударі та деформації шатуна (діаграма в на рис. 3в)

Звідси випливає, що при правильному аналізі діаграми тиску при вимірюванні компресії та порівнянні її з результатами моделювання з'являється можливість не просто локалізувати пошкоджену область (циліндр), але також отримувати перевірені дані про характер та причину серйозних пошкоджень в експлуатації до руйнування двигуна та його розбирання. У разі гідроудару це може запобігти подальшому втомленому руйнуванню шатуна в пошкодженому двигуні [29] і значно, у багато разів, знизити витрати на відновлювальний ремонт.

## Висновки

Розроблена проста термогазодинамічна модель для розрахунку робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння в режимі холодного прокручування при вимірюванні компресії. Модель покроково описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску, витоку повітря через пару деталей і теплообмін зі стінками.

За допомогою моделювання знайдено основні закономірності зміни компресії від режимів, характеру пошкодження сполучених деталей клапанного механізму та циліндропоршневої групи, величини витоку та температури двигуна. В результаті встановлено, що модель дозволяє ввести поправку будь-які показання компресометра, якщо відома частота обертання, при якій виконувався тест, та інші параметри. Тим самим можна виключити вплив експлуатаційних факторів на результати вимірів.

За допомогою моделювання доповнено ві-

домі дані про пошкодження двигунів в результаті гідроудару та деформації шатуна при надходженні рідини до циліндра. Встановлено, що на відміну від інших пошкоджень, що викликають додаткові витоку повітря з циліндра та спотворення діаграми тиску, після гідроудару спостерігається зменшення величини компресії без розширення компенсаційної кишені на діаграмі тиску. Крім того, модель дозволяє лише за діаграмою тиску при холодному прокручуванні розрахувати величину деформації шатуна після гідроудару.

Розроблена модель дає можливість не просто локалізувати пошкоджену область (циліндр), але також отримати перевірені дані про характер та причину серйозних пошкоджень в експлуатації до руйнування двигуна та його розбирання. Тим самим з'являється можливість запобігти подальшому руйнуванню пошкодженого двигуна і значно знизити витрати на відновлювальний ремонт, що раніше неможливо було виконати іншими діагностичними методами. Ці властивості моделі роблять її застосування особливо ефективним при діагностиці та моніторингу технічного стану двигунів в експлуатації.

Як перспективу подальших досліджень передбачається вдосконалення моделі шляхом уточнення параметрів і методів інтегрування розрахункових рівнянь, введення змінної швидкості обертання колінвала, а також продовження дослідження самої моделі за різних видів ушкоджень та пов'язаних з ними витоків.

## Конфлікт інтересів

Автори декларують, що немає конфлікту інтересів щодо даного дослідження, у тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження та його результати, подані у цій статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

## Література

1. Denton T. (2006). Advanced Automotive Fault Diagnosis. Second edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 271.
2. Gilles T. (2011). Automotive Engines: Diagnosis, Repair and Rebuilding, 6th Edition. Delmar: Cengage Learning. 734.

3. Maurya R.K. (2019). Reciprocating Engine Combustion Diagnostics In-Cylinder Pressure Measurement and Analysis. Cham: Springer Nature Switzerland AG. 616.
4. Halderman J.D. (2012). Automotive Technology. Principles, Diagnosis, and Service. Fourth edition. New Jersey: Pearson Education Inc. 1652.
5. Garage Lube (n.d.). Pressure School. Part 2: A Running Diagnosis by Pico Technology. Retrieved from <https://www.garagelube.com/online-training/pressure-school-part-2-running-diagnosis/>.
6. Garage Lube (n.d.). Pressure School. Part 1: Introduction to the Pressure Transducer by Pico Technology. Retrieved from <https://www.garagelube.com/online-training/pressure-school-part-1-introduction-pressure-transducer/>.
7. Burrows J.A. (1998). An investigation into the cold start performance of automotive diesel engines. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham. 224.
8. Pacaud P., Perrin H., Laget O. (2008). Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements? SAE International Journal of Engines. 20. DOI: <https://doi.org/10.4271/2008-01-1310>
9. Roberts A., Brooks R., Shipway Ph. (2014). Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. Energy Conversion and Management. 82. 327–350. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.002>.
10. Kurtyka K., Pielecha J. (2020). Cold start emissions from a gasoline engine in RDE tests at different ambient temperatures. Combustion Engines. 181(2). 24-30. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-2020-204>
11. Reißig M. (2012). Modeling the Cold Start Process of Spark Ignition Engines. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock. Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Universität Rostock. 133.
12. Stotsky A.A. (2009). Automotive Engines. Control, Estimation, Statistical Detection. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 215.
13. Сараєва І.Ю., Хрулев О.Е., Воробйов О.М. (2022). Розробка математичних критеріїв оцінки якості діагностування циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Вип. 22. 92-103. Saraieva I., Khrulev A., Vorobiov O. (2022). Rozrobka matematychnykh kryteriiv otsinky yakosti diahnostuvannya tsylindro-porshnevoi hrupy dvyhuna avtomobilia. [Development of mathematical criteria for assessing the quality of diagnosing the cylinder-piston group of a car engine.] Vehicle and electronics. Innovative technologies, Vol. 22. 92-103. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.10> [in Ukrainian]
14. Сараєва І.Ю., Хрулев О.Е., Воробйов О.М., Себко Д.П. (2020). Цифрова діагностика для визначення герметичності камери згоряння двигуна автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, Вип. 18. 52-64. Saraieva I., Khrulev A., Vorobiov O., Sebko D. (2020). Tsyfrova diahnostryka dlia vyznachennia hermetychnosti kamery zghoriannia dvyhuna avtomobilia. [Digital diagnostics for determining the tightness of the combustion camera of the car engine.] Vehicle and electronics. Innovative technologies, 2020, Vol. 18, 52-64. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2020.18.0.52> [in Ukrainian]
15. Pszczółkowski, J. (2022). The model for cylinder charge parameters during engine starting. Combustion Engines. 188(1). 60-66. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-142029>
16. Bellér, G., Árpád, I., Kiss, J.T., Kocsis, D. (2021). AVL Boost: a powerful tool for research and education. Journal of Physics: Conference Series. 1935 (1). 012015. 9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012015>
17. Cordon, D., Dean, Ch., Steciak, J., Beyerlein, S. (2007). One-Dimensional Engine Modeling and Validation using Ricardo WAVE. Final Report KLK434-B, N07-09. National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho. 45. Retrieved from [https://www.academia.edu/18805887/ONE\\_DIMENSIONAL\\_ENGINE\\_MODELING\\_AND\\_VALIDATION\\_USING\\_RICARDO\\_WAVE](https://www.academia.edu/18805887/ONE_DIMENSIONAL_ENGINE_MODELING_AND_VALIDATION_USING_RICARDO_WAVE)
18. Magdas, V.B., Mastan, D.C., Burnete, N. (2020). Simulation possibilities of the internal combustion engine management elements using Lotus Engine Simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 997 (1). 012121. 11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/997/1/012121>
19. Khrulev A., Saraiev O. (2022). Building a mathematical model of the destruction of a connecting rod-piston group in the car engine at hydraulic lock. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3. 7 (117). 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259454>
20. Medina A., Curto-Risso P.L., Hernández A.C., Guzmán-Vargas L., Angulo-Brown F., Sen A.K. (2014). Quasi-Dimensional Simulation of Spark Ignition Engines. From Thermodynamic Optimization to Cyclic Variability. Springer-Verlag, London. 195.
21. Blair G.P. (1999). Design and Simulation of Four-Stroke Engines. Warrendale, Society of Automotive Engineers, Inc. 815.
22. Gupta, H.N. (2012). Fundamentals of Internal Combustion Engines. PHI Learning Pvt. Ltd., 676.
23. Kalikatzarakis M., Coraddu A., Theotokatos G. and Oneto L. (2021). Development of a zero-dimensional model and application on a medium-speed marine four-stroke diesel engine. Proceedings of MOSES2021 Conference. 3rd International

- Conference on Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems. 11. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/352119154>
24. Fygueroa S., Villamar C., Fygueroa O. (2016). Thermodynamic Study of the Working Cycle of a Direct Injection Compression Ignition Engine. Internal Combustion Engines. Second Edition. Edited by K. Lejda and P. Woś. IntechOpen. 75-112. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/50028>
  25. Heywood J.B. (2018). Internal Combustion Engine Fundamentals. Second Edition. New York, McGraw-Hill Education. 1056.
  26. Kastner L.J., Williams T.J., White J.B. (1963-64). Poppet Inlet Valve Characteristics and their Influence on the Induction Process. Proc.Instrn. Mech.Engrs. Vol.178 Pt.I. No. 36 955-975. DOI: <https://doi.org/10.1177/0020348363178001137>
  27. Khrulev A. (2023). Analysis of pneumatic catapult launch system parameters, taking into account engine and UAV characteristics. Advanced UAV. 3 (1). 10–24. Retrieved from <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1045>
  28. Lanlege D.I., Kehinde R., Sobanke D.A., Garba U.M. (2018). Comparison of Euler and Range-Kutta methods in solving ordinary differential equations of order two and four. Leonardo Journal of Sciences. Issue 32. 10-37. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/331993886\\_Comparison\\_of\\_Euler\\_and\\_Range-Kutta\\_methods\\_in\\_solving\\_ordinary\\_differential\\_equations\\_of\\_order\\_two\\_and\\_four](https://www.researchgate.net/publication/331993886_Comparison_of_Euler_and_Range-Kutta_methods_in_solving_ordinary_differential_equations_of_order_two_and_four)
  29. Khrulev A., Dmitriev S. (2019). Study of the conrod deformation during piston interaction with liquid in the internal combustion engine cylinder. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. Vol. 14. Issue 2. 6557-6569. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.14.2.2020.03.0515>

**Хрулев Олександр Едуардович**<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., судовий автоексперт, тел. +38 096 163 2183, e-mail: [info@engine-expert.com](mailto:info@engine-expert.com),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6841-9225>

**Сараєв Олексій Вікторович**<sup>2</sup>, д.т.н., професор, тел. +38 050 275 5159, e-mail: [sarayev9@gmail.com](mailto:sarayev9@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>

**Сараєва Ірина Юрїївна**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, тел. +38 050-64-00-787, e-mail: [sarayeva9@gmail.com](mailto:sarayeva9@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>

<sup>1</sup>Міжнародне моторне бюро, Шкільна вул., 15, Немішаєве, Київська обл., 07853 Україна

<sup>2</sup>Автомобільний факультет, кафедра автомобілей, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Ярослава Мудрого вул, 25, Харків, 61002 Україна.

### Method for expert evaluation of the technical condition of the cylinder-piston group of automotive engines after hydrolock

**Abstract. Problem:** The study examines the thermogasdynamic process within an internal combustion engine cylinder during cold cranking mode while measuring compression. Analysis of various models and comparison of known data revealed unresolved challenges in constructing mathematical models of the engine operating cycle. The vast majority of practical data and recommendations for compression measurement in a cylinder are based on empirical knowledge, numerous experiments, and tests. Consequently, there arises a need for computational models of the compression measurement process and their theoretical justification, particularly in cases where engine damage occurs during hydrolock in a cylinder. **Methodology.** To address the identified issues, a mathematical model of the thermogasdynamic process within the cylinder during cold cranking while measuring compression was developed. **Originality.** Unlike existing models, this model describes the processes in the cylinder step by step, considering the real nature of intake-exhaust processes, air leakage through part interfaces, and heat exchange with the walls. Through modeling, the main patterns of compression changes depending on the modes and the nature of damage to associated parts of the valve mechanism and the cylinder-piston group were identified, including deformation of the connecting rod during hydraulic lock due to liquid entering the cylinder. **Practical value.** Based on the study results, it was concluded that the model's properties make it effectively applicable in diagnosing and monitoring the technical condition of automotive engines during operation.

**Keywords:** cold cranking, cold start, compression, hydrolock, modeling.

**Alexander Khrulev**<sup>1</sup>, Ph.D., Senior Researcher, forensic expert, tel. +38 096 163 2183, e-mail: [info@engine-expert.com](mailto:info@engine-expert.com), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6841-9225>.

**Oleksiy Saraev**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, tel. +38 050 275 5159, e-mail: [sarayev9@gmail.com](mailto:sarayev9@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6582-560X>

**Irina Saraieva**<sup>2</sup>, Ph.D., Assoc. Professor, tel. +38050-64-00-787, e-mail: [sarayeva9@gmail.com](mailto:sarayeva9@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-471X>

<sup>1</sup>International Motor Bureau, Shkilna str., 15, Nemisshaev, Kyiv region, 07853, Ukraine

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.