УДК 621.434.1

О. О. ОСЕТРОВ , В. А. КОКУШ, Д. С. АЛЬОХІН

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВТРАТ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ДВИГУНІ

В роботі експериментально досліджено механічні втрати в автомобільному двигуні ВАЗ-21081, що обладнано системою електронного керування впорскуванням бензину. Виконане математичне моделювання насосних втрат і визначено втрати на тертя. Проаналізовано вплив частоти обертання колінчастого валу та інших параметрів на ці втрати. Перевірено можливість використання відомих емпіричних залежностей для визначення загальних механічних втрат і втрат на тертя в дослідному двигуні

Ключові слова: механічні втрати, насосні втрати, втрати на тертя, відключення циліндрів, математичне моделювання.

В работе экспериментально исследованы механические потери в автомобильном двигателе ВАЗ-21081, оборудованном системой электронного управления впрыском бензина. Выполнено математическое моделирование насосных потерь и определены потери на трение. Проанализировано влияние частоты вращения коленчатого вала и других параметров на эти потери. Проверена возможность использования известных эмпирических зависимостей для определения общих механических потерь и потерь на трение в опытном двигателе.

Ключевые слова: механические потери, насосные потери, потери на трение, отключение цилиндров, математическое моделирование.

There have been analyzed the known methods for determining the mechanical losses in internal combustion engines. Using the methods of disconnecting cylinders and crankshaft scrolling mechanical losses in the engine VAZ-21081 equipped with electronic control fuel injection system were defined. The influence of the engine speed and other parameters of these losses was investigated. It is shown that the method of disconnecting cylinders makes it possible to obtain more reliable results than the scrolling method. These scientific results correlate well with the data of other researchers. The mathematical modeling of engine process was performed in MATLAB system; losses of pumping and friction were obtained. The possibility of applying known empirical relationships for determination the overall mechanical losses and friction losses in the test engine was verified.

Keywords: mechanical loss, pumping loss, friction loss, the cylinder off, mathematical modeling.

Вступ. Механічні втрати є важливою складовою енергетичного балансу двигуна внутрішнього згоряння. Вони складають 7–11% внесеної з паливом енергії. До механічних втрат відносять втрати на подолання сил тертя в рухливих сполученнях (70-80% від сумарних механічних втрат, які оцінюють середнім тиском механічних втрат $P_м$), на привід допоміжних агрегатів (6-17% від $P_м$), на подолання аеродинамічного опору повітря переміщенню деталей (0,5-1,5% від $P_{мд}$), на здійснення в чотиритактному двигуні процесів газообміну – так звані насосні втрати (14-19% від $P_{мд}$).

Для експериментального визначення механічних втрат, як правило, використовують такі основні методи:

- метод відключення циліндрів;
- метод прокручування двигуна стороннім джерелом енергії;
- метод вибігу;
- метод визначення сумарних механічних втрат за графіком зміни годинної витрати палива на навантажувальній характеристиці;
- метод аналізу індикаторної діаграми при роботі на холостому ході;
- метод співставлення індикаторної та ефективної потужності.

Ці методи дозволяють визначити інтегральні показники, що характеризують механічні втрати: потужність механічних втрат, середній тиск механічних втрат, механічний ККД двигуна тощо.

Для визначення $P_м$ різними дослідниками запропоновані узагальнені емпіричні залежності, коефіцієнти яких залежать від типу двигуна [1-4]. Наприклад, у роботі [1] запропоновано залежність середнього тиску втрат на тертя від відношення частоти обертання колінчастого валу на поточному режимі роботи двигуна n до частоти обертання на номінальному режимі $n_н$:

$$P_м = a + b\frac{n}{n_н}, \quad (1)$$

де a, b - для двигунів із зовнішнім сумішоутворенням рекомендовано a=0,08, b=0,15 за $n_н$ = 5000 об/хв.

Для моделювання робочого процесу двигуна така оцінка не завжди підходить. Математична модель газообміну передбачає розрахункове визначення насосних втрат, а втрати на тертя в механізмах двигуна визначають за емпіричними залежностями. Тобто ці дві основні складові механічних втрат визначаються окремо, після чого знаходять інтегральний показник:

$$P_м = P_{мд} + P_{нх}, \quad (2)$$

де $P_{мд}$ – середній тиск втрат на тертя в механізмах двигуна; $P_{нх}$ – середній тиск насосних втрат. Іншими складовими механічних втрат в автомобільних безнаддувних бензинових двигунах, як правило, нехтують.

Для визначення втрат на тертя, як правило, використовують лінійні залежності, подібні до рівняння (1). Наприклад, у роботі [2] запропоновано залежність втрат на тертя $P_{мд}$ від середньої швидкості поршня Cm:

$$P_{мд} = a + b \cdot C_m, \quad (3)$$

де для «короткоходових» бензинових двигунів a=0,04; b=0,0135.

© О. О. Осетров, В. А. Кокуш, В. С. Альохін, 2017

ISSN 2079-0066 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

Результати розрахунку за відомими залежностями є приблизними і не завжди відповідають параметрам конкретного двигуна. Для більш точної оцінки механічних втрат на тертя в дослідному двигуні доцільно спочатку за результатами експериментальних досліджень визначити загальні механічні втрати $P_м$, потім розрахувати (або визначити експериментально за результатами індиціювання циліндра) насосні втрати $P_{нх}$, після чого знайти втрати на тертя $P_{мд}$ як різницю ($P_м$ – $P_{нх}$). І вже дані, отримані за результатами означених досліджень, є основою для уточненого математичного опису втрат на тертя і перевірки відомих емпіричних залежностей.

Таким чином, метою роботи є дослідження і математичне моделювання складових механічних втрат в двигуні ВАЗ 2108, що обладнано системою упорскування бензину до впускного колектора.

Методика і результати досліджень. Схема експериментального стенду наведена на рис. 1. Двигун обладнано системою впорскування бензину до впускного колектора двигуна. На двигун встановлено комплекс датчиків, за сигналами яких електронний блок керування визначає момент початку і тривалість керуючого імпульсу, що подається на електромагніти паливних форсунок.

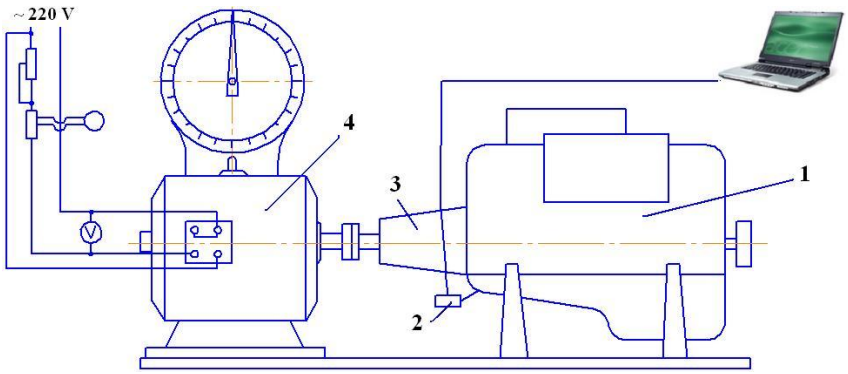

Рис. 1 – Схема експериментального стенду з двигуном ВАЗ 21081: 1 – двигун, оснащений контрольно-вимірювальними приладами і пристроями, що забезпечують його роботу; 2 – діагностичний роз'єм; 3 – коробка передач; 4 – навантажувальний пристрій / електродвигун для приводу колінчастого вала при прокрутці

В роботі для визначення механічних втрат використовувалися експериментальні методи відключення циліндрів і прокручування двигуна від стороннього джерела енергії.

За методом відключення циліндрів дослідження проводилися на режимах швидкісної характеристики з частотою обертання колінчастого валу від 2800 до 3600 хв$^{-1}$. Для підвищення точності випробування проводили два рази у різні дні.

Після стабілізації параметрів режиму роботи двигуна проводили вимірювання навантаження і частоти обертання колінчастого валу, за якими визначали потужність двигуна. Далі на робочому двигуні вимикали подачу палива до першого циліндра і проводили відповідні вимірювання, після чого включали подачу палива. Ці дії повторювали для другого, третього і четвертого циліндрів двигуна.

Індикаторні потужності відключених циліндрів визначалися за залежністю

$$N_{\text{iк}} = N_{\text{e}} - N_{\text{eк}},$$

де N_{e}- ефективна потужність двигуна; $Ne_к$ – ефективна потужність двигуна при $к$-му відключеному циліндрі.

Потужність механічних втрат

$$N_{\text{M}} = N_{\text{e}} - \sum_{\text{к}=1}^{z} N_{\text{iк}},$$

де z – загальна кількість циліндрів двигуна.

Відповідно середній тиск механічних втрат

$$\text{P}_{\text{м}} = \frac{120 N_{\text{м}}}{z V_h n}.$$

Для прокручування двигуна від стороннього джерела енергії використовувався електродвигун постійного струму. Дослідний двигун попередньо прогрівали до досягнення сталого температурного режиму.

Потім вимикали подачу палива, включали електродвигун, доводили частоту обертання до заданої, після чого проводили вимірювання навантаження та частоти обертання ротора електродвигуна. Дослідження проводили при різних частотах обертання колінчастого валу двигуна від 1500 хв$^{-1}$ до 2700 хв$^{-1}$. Подальше збільшення частоти обертання колінчастого вала обмежувалося максимально припустимою частотою обертання вала електродвигуна.

Результати визначення загальних механічних втрат за методами відключення циліндрів і прокручування показані на рис. 2.

Видно, що механічні втрати, що визначені за методом прокручування у різні дні випробувань (на графіку позначені «дослідження №1» і «дослідження №2»), добре погоджуються одне з одним і лежать на похилій прямій. Зі збільшенням частоти обертання колінчастого валу ці втрати також зростають. Зокрема, при збільшенні *n* від 1500 до 2700 хв$^{-1}$ загальні механічні втрати зростають на 26%. Подібна тенденція відзначена в роботах [1-4].

Слід зазначити, що загальні механічні втрати, що визначені за методом прокручування колінчастого валу, перевищують механічні втрати, визначені за методом відключення циліндрів. Найбільш чітко це видно для швидкісного режиму двигуна із частотою обертання колінчастого валу 2700 хв$^{-1}$, де різниця в значеннях $P_м$, що визначені за двома методами, складає близько 20%.

Це можна пояснити значним остиганням двигуна в процесі прокручування від електродвигуна й відповідним зростанням механічних втрат. Окрім того, наявність коробки передач також призводить до збільшення механічних втрат порівняно із втратами на робочому двигуні.

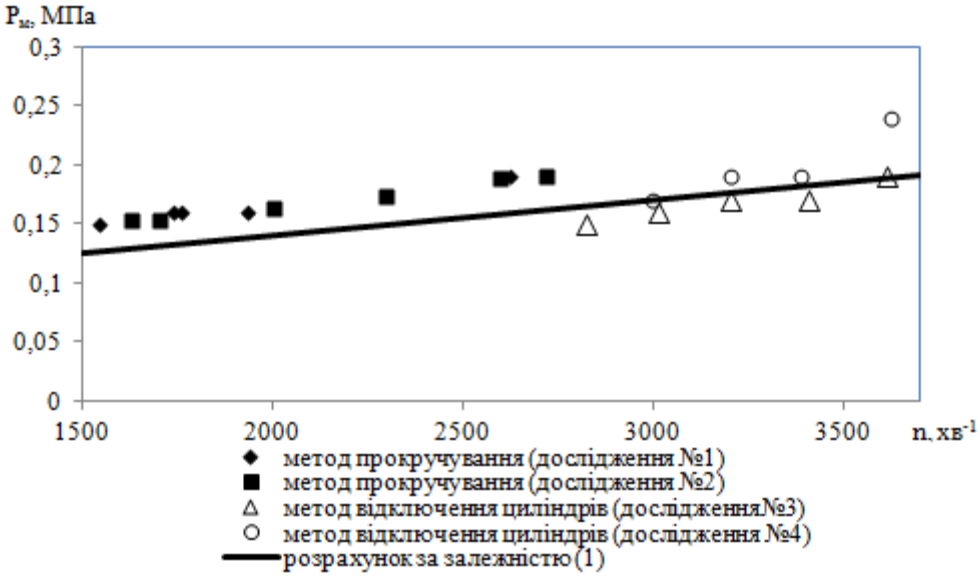

Рис. 2 - Результати визначення загальних механічних втрат за методами відключення циліндрів і прокручування колінчастого валу

Більш достовірними, на наш погляд, є механічні втрати, що визначені за методом відключення циліндрів. Результати, що отримані за цим методом, погоджуються з даними інших дослідників. З рис. 2 видно, що крива, побудована за рівнянням (1) з роботи [1] добре корелюється з експериментальними даними. Відносна різниця між розрахунковими і експериментальними даними не перевищує 20%, що не більше за точність експериментальних методів, які використовувалися в роботі.

Слід також відзначити майже однаковий нахил розрахункових і експериментальних кривих, що підтверджує правильність використання рівняння (1) для розрахунку загальних механічних втрат і застосування цього рівняння для біль широкого діапазону швидкісних режимів роботи двигуна.

Для визначення втрат на тертя в дослідному двигуні проводилося моделювання робочого процесу, зокрема газообміну, в циліндрі двигуна ВАЗ-21081. Математичну модель реалізована в програмному середовищі MATLAB. Зовнішній вид вікна із з програмою та результатами розрахунків представлено на рис. 3. За результатами розрахунків визначали середній тиск насосних втрат на режимах зовнішньої швидкісної характеристики, після чого з рівняння (2) знаходили втрати на тертя $P_{мд}$ як різницю середнього тиску механічних втрат і середнього тиску насосних втрат.

Середній тиск насосних втрат і середній тиск втрат на тертя, визначені за представленою методикою, показані на рис. 4. На цьому ж рисунку представлені результати розрахунку втрат на тертя за залежністю (3) з роботи [2].

Аналіз даних рис. 2 і 4 показує, що насосні втрати складають 30-35% від загальних механічних втрат в діапазоні частоти обертання колінчастого валу від 3000 хв$^{-1}$ до 3700 хв$^{-1}$. При збільшенні частоти обертання колінчастого валу насосні втрати також зростають, проте це збільшення є незначним - близько 7% в розглянутому діапазоні зміни *n*. З рис. 4 видно, що втрати на тертя, що визначені обробкою експериментальних даних, змінюються подібно до загальних механічних втрат – зростають зі збільшенням частоти обертання.

Перевірка доцільності використання залежності (3) показала, що вона дає адекватні результати в розглянутому діапазоні зміни частоти обертання – відносна різниця між результатами розрахунку за цією залежністю і визначеними за даними експерименту не перевищила 27%.

ISSN 2079-0066 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

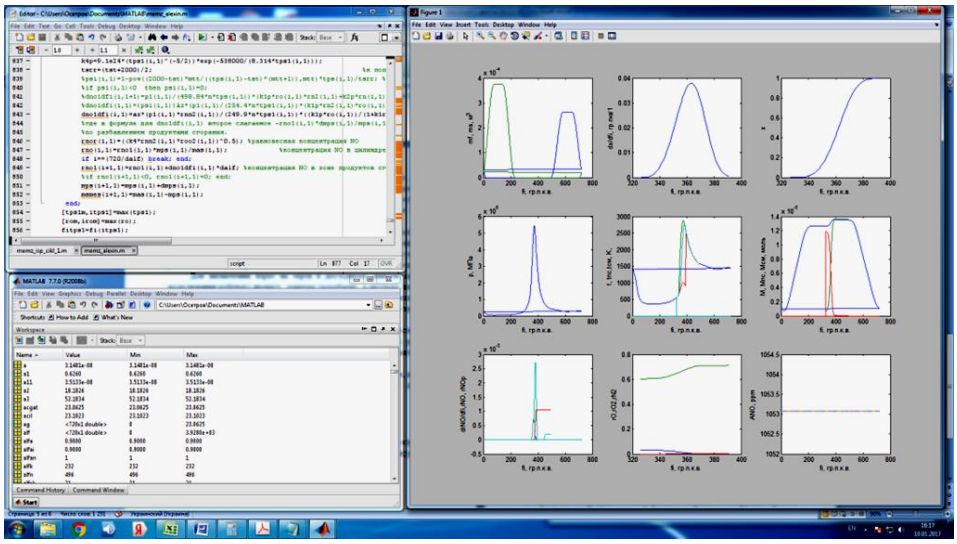

Рис. 3 - Зовнішній вид вікна із з програмою та результатами розрахунків

Це знаходиться в межах точності розглянутих експериментальних методів.

Таким чином, за результатами досліджень, що виконані в роботі, можна рекомендувати залежності (1) і (3) для визначення відповідно загальних механічних втрат і втрат на тертя для двигуна ВАЗ-21081

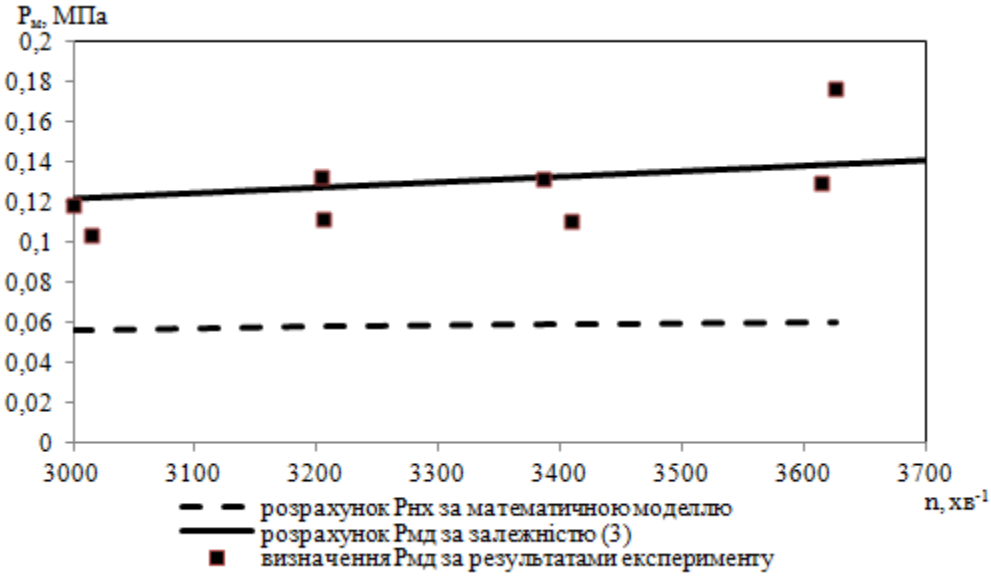

Рис. 4 - Результати визначення складових загальних механічних втрат

Висновки. У роботі наведено результати розрахунково-експериментального дослідження механічних втрат у двигуні ВАЗ-21081. Отримано такі основні результати:

1. Проаналізовано експериментальні й розрахункові методи визначення механічних втрат. Показано, що механічні втрати пропорційно зростають із збільшенням частоти обертання колінчастого валу. Наведено приклади емпіричних залежностей $P_м$ від n. Показано, що для оцінки складових механічних втрат – втрат на тертя і насосних втрат - потрібно проводити додаткові експериментальні або розрахункові дослідження.

2. Проаналізовано результати експериментального дослідження. Показано, що більш точним методом з тих, що використовувалися в роботі, є метод відключення циліндрів. Результати визначення загальних механічних втрат за цим методом добре погоджуються з даними інших дослідників. За результатами експериментальних досліджень рекомендовано використання залежності (1) для визначення загальних механічних втрат в дослідному двигуні.

3. Наведено результати розрахункового дослідження складових механічних втрат. За результатами розрахунків робочого процесу дослідного двигуна визначено насосні втрати і втрати на тертя. Показано, що насосні втрати незначно зростають при збільшенні частоти

обертання колінчастого валу (приблизно на 7 % в діапазоні зміни частоти обертання колінчастого валу від 3000 хв$^{-1}$ до 3700 хв$^{-1}$). Втрати на тертя, що визначені обробкою експериментальних даних, змінюються подібно до загальних механічних втрат – зростають зі збільшенням частоти обертання колінчастого валу.

4. За результатами розрахункових досліджень рекомендовано використання залежності (3) для оцінки втрат на тертя в двигуні ВАЗ-21081.

Список літератури

1. *Дяченко В. Г.* Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія : підручник / В. Г. Дяченко ; За ред.. А. П. Марченка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. –488 с.
2. *Дьяченко Н .Х.* Теория двигателей внутреннего сгорания. Под ред. проф. д-ра техн.. наук Н. Х. Дьяченко. Л., Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1974. – 552 с.
3. *Колчин А. И.* Расчет автомобильных и тракторных двигателей : Учеб. пособие для вузов /А. И. Колчин, В. П. Демидов – 3-е изд. перераб и доп. – М.: Высш шк., 2002. – 496 с.
4. *Орлин А.С.* Двигатели внутреннего сгорания. Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей / ред. Орлин А.С., Круглов М.Г. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

References (transliterated)

1. *Dyachenko V. G.* Dviguni vnutrishnyogo zgoryannya. Teotiya : pidruchnik [Internal combustion engines. Theory: the textbook] / *V. G. Dyachenko ; Edit. A. P. Marchenko.* – Kharkiv : NTU “KHPI”, 2008. – 488 p.
2. *Dyachenko N.* Kh. Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya [The theory of internal combustion engines]. Edit. prof., doct. techn. sciens. N. Kh. Dyachenko. L.: Mashinostroyeniye (Leningr. branch), 1974. – 552 c.
3. *Kolchin A. I.* Raschet avtomobilnich i traktornikh dvigateley : ucheb. posobiye dlya vuzov [Calculation of automobile and tractor engines : A manual for schools] / *A. I. Kolchin, V. P. Demidov* - 3rd ed. revised and enlarged. – M.: Vysh. Shk., 2002/ –496 p.
4. *Orlin A. S.* Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Construktciya i raschrt porshnevikh i combinirivannikh dvigateley [Internal combustion engines. Design and calculation of piston and combined engines] / *Edit. A. S. Orlin, M.G. Kruglov*. – M.: Mashinostroyeniye, 1984. – 384 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження і математичне моделювання механічних втрат в автомобільному двигуні / О. О. Осетров, В. А. Кокуш, Д. С. Альохін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 5 (1227). – С. 59–63. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.

Экспериментальное исследование и математическое моделирование механических потерь в автомобильном двигателе / А. А. Осетров, В. А. Кокуш, Д. С. Алехин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 5 (1227). – С. 59–63. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0023.

Experimental study and mathematical modeling of mechanical losses in car engine / A. A. Osetrov, V. A. Kokush, D. S. Alyokhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport engineering. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1227). – P. 59–63. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Осетров Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння; тел.: (050) 999-79-65; e-mail: osetrov2010@gmail.com.

Осетров Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания; тел.: (050) 999-79-65; e-mail: osetrov2010@gmail.com.

Osetrov Aleksandr Aleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Internal combustion engines; tel.: (050) 999-79-65; e-mail: osetrov2010@gmail.com.

Кокуш Валерій Авадійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», майстер виробничого навчання кафедри двигунів внутрішнього згоряння; тел.: (057) 707-68-48.

Кокуш Валерий Авадиевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», мастер производственного обучения кафедры двигателей внутреннего сгорания; тел.: (057) 707-68-48.

Kokush Valery Avadyevych– National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master of industrial training at the Department of Internal combustion engines; tel.: (057) 707-68-48.

Альохін Дмитро Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (068) 647-41-77; e-mail: alyokhindima@gmail.com.

Алехин Дмитрий Сергеевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (068) 647-41-77; e-mail: alyokhindima@gmail.com.

Alyokhin Dmitry Sergeyevich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (068) 647-41-77; e-mail: alyokhindima@gmail.com.