

Вплив на потужність двигуна колісної машини механічних втрат при відключенні циліндрів

Запропонована методика розрахунку механічних втрат, яка дозволяє з точністю близько 10 % визначати вплив кількості відключених циліндрів на ефективну по-тужність двигуна, потужність механічних втрат і механічний ККД.

Встановлено, що при відключенні половини циліндрів: номінальна потужність станове 35–40 %, розбіжність експериментальних і розрахункових результатів коефіцієнта зміни потужності механічних втрат не більше 8 %; розбіжність розрахункових і експериментальних результатів коефіцієнта навантаження по потужності не більше 5 %; механічний ККД при завантаженні 48 % підвищується на 7 %. Із збільшенням кількості відключених циліндрів в двигуні, збільшується потужність механічних втрат та зменшується механічний ККД.

Встановлено кореляційний зв'язок механічного ККД та ефективної потужності двигуна: із збільшенням кількості відключених циліндрів (факторна ознака) в двигуні, збільшується потужність механічних втрат (результативна ознака) та зменшується механічний ККД.

Ключові слова: зміна; потужність; механічні втрати; колісна машина; двигун; відключення циліндрів.

Постановка проблеми. Потужність механічних втрат всіх варіантах механічного ККД змінюється однаково [1], що залежить головним чином від частоти обертання колінчатого валу та залишається постійною. Тому механічний ККД більшою мірою коренізується разом з потужністю механічних втрат (зниження насосних втрат). Автотракторні двигуни досягають максимального механічного ККД при навантаженні близько 75 % від номінальної, і величина механічного ККД залишається практично незмінною при зниженні навантаження до 50 % від номіналу. При навантаженні нижче, ніж 40 % від номінальної умови роботи двигуна істотно відрізняються від оптимальних, і механічний ККД знижується дуже швидко. У високонапружених двигунів поріг, нижче якого відбувається різке зниження механічного ККД, становить близько 30 % номінального навантаження. Крім цього автотракторний двигун працює на режимі холостого ходу, на який за даними [2] доводиться більше 22 % експлуатаційного часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі літератури з'ясовано, що відомості для визначення механічних втрат при відключенні циліндрів відсутні [3]. Дуже часто номінальна потужність автотракторного двигуна є надлишковою з точки зору навантаження – двигуни досить нечасто експлуатуються при повному навантаженні [3]. За даними досліджень [3], що проводилися на підприємствах країн ЄС, в середньому двигуни експлуатуються при навантаженні, що становить 60 % номінальної. Згідно [4] електродвигуни досягають максимального механічного ККД при навантаженні від 60 до 100 % номінальної. За даними [5] (США) зв'язок ККД і навантаження у двигунів істотно інша.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є покращення експлуатаційних показників автотракторного двигуна шляхом визначення потужності механічних втрат та обґрунтування кількості відключених циліндрів.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

- визначити вплив механічних втрат під час відключення частини циліндрів автотракторних двигунів на їх ефективну потужність;
- визначити потужність механічних втрат та механічний ККД при навантаженні автотракторного двигуна при відключенні циліндрів;
- провести кореляційно-регресійний аналіз залежності механічного ККД від величини ефективної потужності двигуна при різному числі працюючих циліндрів.

Викладення основного матеріалу. Якщо у циліндр з поршнем припиняється подача палива, а він продовжує працювати вхолосту, то при цьому слід враховувати додаткові втрати енергії, що витрачаються на рух поршня і пов'язаних з ним механізмів.

Потужність механічних втрат багатоциліндрового автотракторного двигуна при різному числі працюючих циліндрів без наддуву N_{mv} складається з наступних складових – потужність, що витрачається на подолання тертя $N_{тер}$, потужність, що витрачається на вчинення насосних ходів $N_{нв}$, потужність на привід допоміжних механізмів $N_{дм}$ (паливного, масляного і водяного насоса, вентилятора, газорозподільного механізму) та потужність, що витрачається за рахунок зміни теплового балансу між працюючими та непрацюючими циліндрами N_t :

$$N_{\text{мв}} = \frac{N_i}{\eta_{\text{м}}} (1 - \eta_{\text{м}}) \quad (1)$$

або

$$N_{\text{мв}} = N_{\text{тер}} + N_{\text{нв}} + N_{\text{дм}} + N_i, \quad (2)$$

де N_i – індикаторна потужність двигуна; $\eta_{\text{м}} = \frac{N_e}{N_{\text{мв}} + N_e}$ – механічний ККД двигуна; N_e – ефективна потужність двигуна без відключення циліндрів.

Потужність механічних втрат двигуна при різній кількості працюючих циліндрів $N_{\text{мв}}^{\text{зр}}$ можна представити в такому вигляді [6]:

$$N_{\text{мв}}^{\text{зр}} = N_{\text{мв}} \cdot \left(\frac{z_{\text{р}} \cdot k_1}{i} + \frac{z_{\text{в}} \cdot k_2}{i} \right), \quad (3)$$

де i – число циліндрів; $z_{\text{р}}$ – число працюючих циліндрів; $z_{\text{в}}$ – число відключених циліндрів; k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну механічних втрат у працюючих циліндрах (для розрахунку прийємо допущення, що механічні втрати не змінюються від навантаження); k_2 – коефіцієнт, що враховує зміну механічних втрат у відключених циліндрах:

$$k_2 = f_{\Delta} \cdot \Delta_{\text{мв}}, \quad (4)$$

де f_{Δ} – коефіцієнт, що характеризує зміну втрат на тертя при прокручуванні циліндрів (для розрахунку прийємо допущення, що вони не змінюються);

$\Delta_{\text{мв}}$ – частка потужності механічних втрат відключених циліндрів, порівняно з потужністю механічних втрат циліндрів двигуна без відключень.

При відключенні тільки подачі палива:

$$\Delta_{\text{мв}} = 1 - \Delta_{\text{пн}} - \Delta_i, \quad (5)$$

де $\Delta_{\text{пн}}$ – частка механічних втрат, що витрачається на привід паливного насосу;

Δ_i – частка втрат від зміни температурного балансу.

При відключенні палива і усуненні насосних втрат в ЦПП за рахунок впровадження перепускного клапану в камеру згорання:

$$\Delta_{\text{мв}} = 1 - (\Delta_{\text{пн}} + \Delta_i + \Delta_{\text{нх}}), \quad (6)$$

де $\Delta_{\text{нх}}$ – частка втрат на насосні ходи.

При відключенні палива та усуненні насосних втрат в ЦПП за рахунок впровадження перепускного клапану в камеру згорання, а також при можливості конструкції двигуна відключити привод ГРМ, частка потужності механічних втрат відключених циліндрів буде мати вигляд:

$$\Delta_{\text{мв}} = 1 - (\Delta_{\text{пн}} + \Delta_i + \Delta_{\text{нх}} + \Delta_{\text{гpm}}), \quad (7)$$

де $\Delta_{\text{гpm}}$ – частка втрат, що витрачається на привід механізму газорозподілу.

В результаті підстановки (4) в (3) отримаємо вираз для визначення механічних втрат двигуна при відключенні частини його циліндрів

$$N_{\text{мв}}^{\text{зр}} = N_{\text{мв}}^i \cdot \left(\frac{z_{\text{р}}}{i} \cdot k_1 + \frac{z_{\text{в}}}{i} \cdot f_{\Delta} \cdot \Delta_{\text{мв}} \cdot \Delta_i \right), \quad (8)$$

де $N_{\text{мв}}^i$ – потужність механічних втрат двигуна без відключення циліндрів.

Позначимо вираз в дужках як $k_{\text{мт}}$ – коефіцієнт, що характеризує зміну потужності механічних та температурних втрат двигуна при відключенні частини циліндрів

$$N_{\text{мв}}^{\text{зр}} = N_{\text{мв}}^i \cdot k_{\text{мт}}. \quad (9)$$

При допущеннях, що $k_1 = 1$ і $f_{\Delta} = 1$ [7].

$$k_{\text{мт}} = \frac{z_{\text{р}}}{i} + \frac{z_{\text{в}}}{i} \cdot \Delta_{\text{мв}} \cdot \Delta_i. \quad (10)$$

З метою перевірки запропонованого розрахунку механічних втрат двигуна при виключенні частини циліндрів, проведені експериментальні дослідження двигуна КамАЗ-740 [8]. Стендові дослідження двигуна проводилися в умовах авторемонтного виробництва ХАРЗ-110 та ХАРЗ-126 м. Харкова за посередньою участю кафедри «Технології машинобудування і ремонту машин» ХНАДУ. Гальмівний стенд був обладнаний вимірювальними пристроями та контрольною апаратурою згідно ГОСТ 14846-81 (СТ СЭВ 765-77) [8] і включав в себе електричну балансиру машину АКБ 101-4 за допомогою якої здійснювалося навантаження.

При відключенні подачі палива і усуненні насосних втрат в ЦПГ в чотирьох циліндрах згідно з розрахунком, потужність механічних втрат зменшується на 10,7 % (рис. 1).

Один з основних показників механічних втрат двигуна – механічний ККД η_m . Максимальне його значення досягається при номінальній потужності двигуна, яка при відключенні циліндрів змінюється, а її величину N_e^{Zp} можна визначити з виразу:

$$N_e^{Zp} = N_e \cdot k_{PN}, \quad (11)$$

де k_{PN} – коефіцієнт завантаження двигуна по потужності, що характеризує зміну ефективної потужності двигуна при відключенні частини циліндрів.

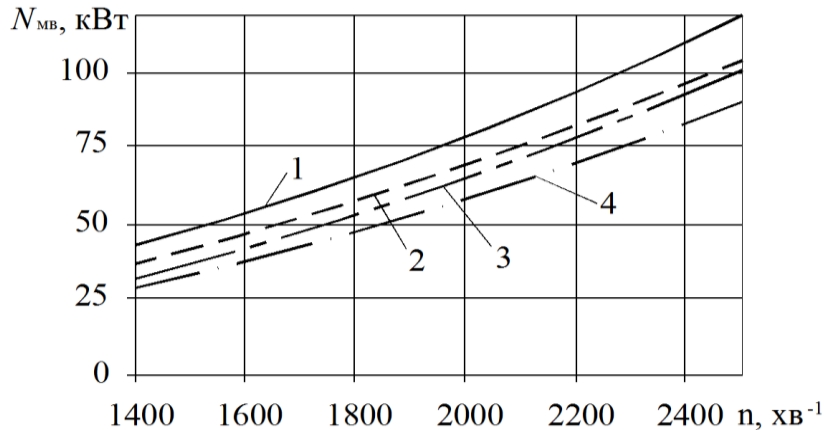


Рис. 1. Залежність параметрів механічних втрат двигуна КамАЗ-740 від частоти обертання колінчатого валу при всіх та половині працюючих циліндрів: 1 – $N_{мв8}$ експ.; 2 – $N_{мв4}$ експ.; 3 – $N_{мв8}$ розр.; 4 – $N_{мв4}$ розр.

Визначимо k_{PN} з припущення, що теоретична індикаторна потужність одного працюючого циліндра:

$$N_i^{1Zp} = N_i^i / i, \quad (12)$$

де N_i^{1Zp} – теоретична індикаторна потужність одного працюючого циліндра двигуна; N_i^i – індикаторна потужність двигуна.

Індикаторна потужність двигуна при відключенні циліндрів при максимальній подачі палива дорівнює:

$$N_i^{Zp} = N_i^i / i \cdot z_p. \quad (13)$$

За допомогою виразу:

$$N_e^{Zp} = N_i^{Zp} - N_{мв}^{Zp} \quad (14)$$

з урахуванням (8), (11), (13) і деяких перетворень визначимо коефіцієнт зміни потужності двигуна при відключенні циліндрів k_{PN} :

$$k_{PN} = \frac{z_p}{i \cdot \eta_m} \cdot (1 - k_1 + k_1 \cdot \eta_m) - \frac{z_b}{i} \cdot d \cdot \Delta_{мв} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right). \quad (15)$$

При допущеннях $k_1 = 1$ і $f_\Delta = 1$ отримаємо [7]:

$$k_{PN} = \frac{z_p}{i} - \frac{z_b}{i} \cdot \Delta_{мв} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right). \quad (16)$$

Таким чином потужність багатциліндрового автотракторного двигуна при різному числі працюючих циліндрів без наддуву з урахуванням (11), (14) та (16):

$$N_e^{Zp} = N_e \cdot \left(\frac{z_p}{i} - \frac{z_b}{i} \cdot \Delta_{мв} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \right). \quad (17)$$

Показники механічних втрат визначали для двигуна, частки складових механічних втрат якого відомі з [8, 9]: $\Delta_{мв} = 0,015 - 0,02$ %; $\Delta_{мк} = 0,13 - 0,15$ %.

При експериментальному дослідженні з підвищенням частоти обертання валу двигуна від 1400 $хв^{-1}$ до 2400 $хв^{-1}$ при номінальній потужності $N_{ном} = 154,5$ кВт, потужність механічних втрат вихідного двигуна збільшилася від 42,65 кВт до 118,1 кВт, або на $\Delta N_{мв} = 75,45$ кВт, а після усунення насосних втрат у першому, четвертому, шостому та восьмому циліндрах із зростанням частоти обертання валу двигуна в тих же межах – від 36,65 кВт до 104,25 кВт, або на $\Delta N_{мв} = 67,6$ кВт.

Зниження потужності механічних втрат із зменшенням числа працюючих циліндрів двигуна відбувається тому, що в відключених циліндрах припиняється процес газообміну, насосні втрати стають рівними нулю, при цьому робота, що витрачається на стиснення повітря в циліндрі, практично дорівнює роботі повітря при розширенні. Коефіцієнт зміни потужності механічних втрат двигуна $k_{\text{мт}}$ з підвищенням частоти від 1400 до 2400 хв^{-1} незначно збільшується і відрізняється від розрахункового не більше ніж на 8 %.

Розрахунковий коефіцієнт навантаження по потужності двигуна $k_{\text{рн}}$, збільшується пропорційно кількості працюючих циліндрів і характеризує зростання максимальної ефективної потужності двигуна [6]. Розрахункові та експериментальні значення $k_{\text{рн}}$ відрізняються не більш ніж на 5 % (рис. 2).

Характер зміни механічного ККД від коефіцієнта завантаження двигуна при всіх працюючих і відключених циліндрах практично однаковий (рис. 3), а максимальна величина його при всіх працюючих циліндрах $\eta_{\text{мт}} = 0,83$; при семи – 0,79; при шести – 0,68; при п'яти – 0,5; при чотирьох – 0,34; при трьох – 0,14; при двох – 0,04 що практично неможливо тому, що потужність механічних втрат є більшою ніж ефективна потужність двигуна, як видно на рисунку 3 при величині механічного ККД менше 1 %.

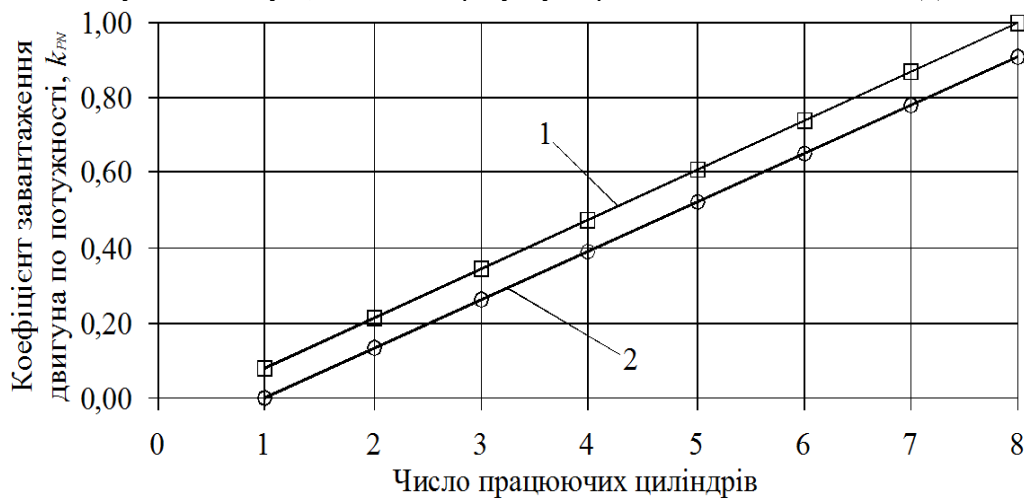


Рис. 2. Залежність розрахункового та експериментального коефіцієнта зміни номінальної потужності двигуна КамАЗ-740 від числа працюючих циліндрів ($n = 2400 \text{ хв}^{-1}$): 1 – розрахункова; 2 – експериментальна

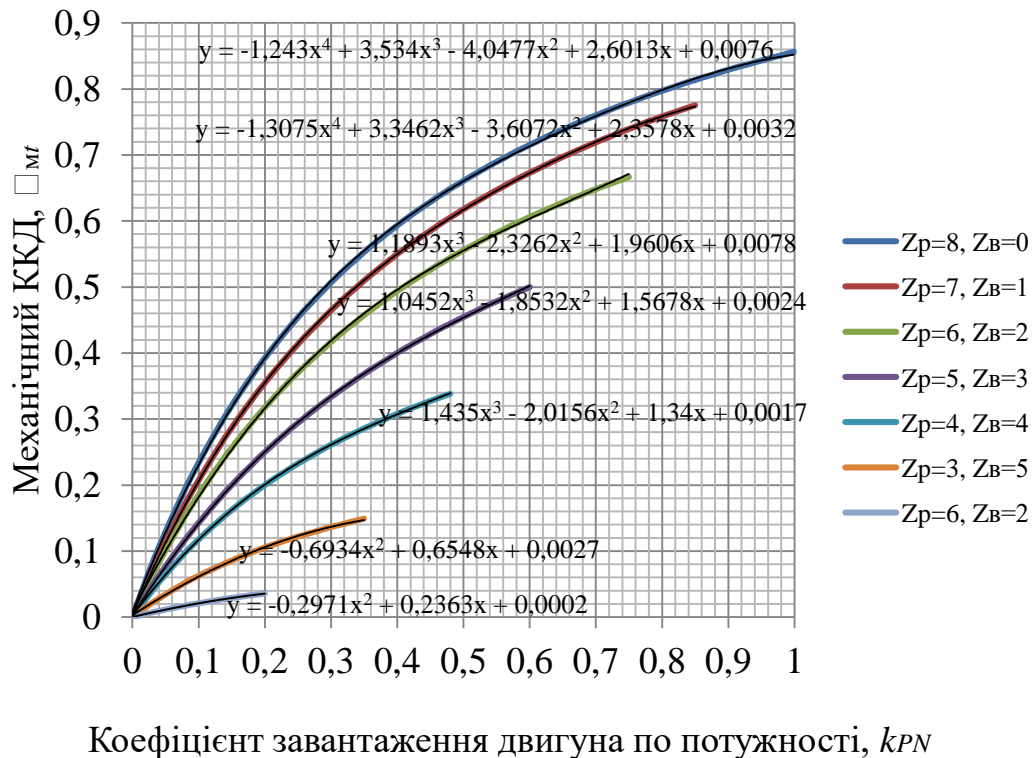


Рис. 3. Кореляційна залежність механічного ККД від величини потужності двигуна при різному числі працюючих циліндрів

Кореляційний аналіз залежності механічного ККД від величини ефективної потужності двигуна при різному числі працюючих циліндрів вирішує дві основні задачі. Перша задача полягає у визначенні типу рівняння регресії. Це дуже важливо, так як від правильного вибору залежить кінцевий результат вивчення взаємозв'язку між механічними втратами під час різної кількості непрацюючих циліндрів на ефективну потужність автотракторного двигуна колісної машини.

Друга задача полягає у виборі поліному рівняння регресії механічних втрат під час різної кількості непрацюючих циліндрів на ефективну потужність двигуна колісної машини з метою встановити ступінь впливу кількості непрацюючих циліндрів на потужність двигуна в залежності від навантаження на двигун. Вона вирішується математичним шляхом визначення параметрів кореляційного рівняння.

Визначальна роль у виборі форми зв'язку між цими параметрами належить теоретичному аналізу. Так, чим більша кількість відключених циліндрів (факторна ознака) в двигуні, тим більша потужність механічних втрат (результативна ознака) та зменшується механічний ККД. Із зростанням факторної ознаки тут, як правило, рівномірно зростає і результативний, тому залежність між ними може бути виражена рівнянням поліноміальної функції для кожного окремого випадка відключення кількості циліндрів (рис. 3).

Висновки. З метою підвищення точності отриманих результатів:

- запропонована методика розрахунку механічних втрат, яка дозволяє з точністю близько 10 % визначити вплив кількості відключених циліндрів на ефективну потужність двигуна, потужність механічних втрат і механічний ККД;
- встановлено, що при відключенні половини циліндрів: номінальна потужність становить 35–40 %, розбіжність експериментальних і розрахункових результатів коефіцієнта зміни потужності механічних втрат не більше 8 %; розбіжність розрахункових і експериментальних результатів коефіцієнта навантаження по потужності не більше 5 %; механічний ККД при завантаженні 48 % підвищується на 7 %;
- встановлено кореляційний зв'язок механічного ККД та ефективної потужності двигуна: із збільшенням кількості відключених циліндрів (факторна ознака) в двигуні, збільшується потужність механічних втрат (результативна ознака) та зменшується механічний ККД.

Список використаної літератури:

1. Куций П.В. Поліпшення експлуатаційних показників транспортних засобів в неусталених режимах оптимізацією способу регулювання дизелів : дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.20 / П.В. Куций. – К. : НТУ, 2015. – 206 с.
2. Янулявичус А. Оценка нагруженности двигателя при эксплуатации трактора / А.Янулявичус, Г.Пуппинс, А.Юостас // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 45–48.
3. Суркин В.И. Анализ изменения механических потерь дизеля тракторно-транспортного агрегата при отклонении части цилиндров / В.И. Суркин, С.Ю. Федосеев, А.А. Петелин // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 7. – С. 80–82.
4. Мустякимов Р.Н. Повышение эффективности использования МТА за счет контроля и оценки полноты загрузки двигателя : автореф. дис. ... к.т.н. : Спец. 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» / Р.Н. Мустякимов. – Пенза, 2010. – 19 с.
5. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу : <http://www.ippc-russia.org/content/id/ru/207.html>.
6. Энергетический менеджмент. Руководство по энергосбережению концерна Du Pont (США). – Нижний Новгород : Изд-во «Чувашия», 1997. – 223 с.
7. Крылова Н. О погрешностях способов определения механических потерь в двигателях внутреннего сгорания / Н.Крылова // Труды МВТУ. – 1977. – № 257. – С. 59–70.
8. Молодан А.А. Оценка технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя с учетом разделения потоков газов, проходящих в картер : дис. ... к.т.н. : Спец. 05.22.20 / А.А. Молодан. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 184 с.
9. Баширов Р.М. Методика исследования дизелей регулируемых пропуском впрыска топлива / Р.М. Баширов, В.Н. Хусаинов, А.М. Миннигалеев. – Уфа : БГАу, 2011. – 112 с.

References:

1. Kucyj, P.V. (2015), *Polipshennija ekspluatacijnyh pokaznykiv transportnyh zasobiv v neustalenyh rezhymah optyimizacijeu sposobu reguljuvannja dyzeliv*, k.t.n. thesis of diss., Spec. 05.22.20, NTU, Kyi'v, 206 p.
2. Januljavychus, A., Puppyns, G. and Juostas, A. (2010), «Ocenka nagruzhenosti dvigatelja pri jekspluataciji traktora», *Traktory i sel'hoz mashiny*, No. 4, Pp. 45–48.
3. Surkin, V.I., Fedoseev, S.Ju. and Petelin, A.A. (2012), «Analiz izmenenija mehanicheskikh poter' dizelja traktorno-transportnogo agregata pri otkljuchenii chasti cilindrov», *Dostizhenija nauki i tehniky APK*, No. 7, Pp. 80–82.
4. Mustjakimov, R.N. (2010), *Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija MTA za schet kontrolja i ocenki polnoty zagruzki dvigatelja*, Abstract of diss. k.t.n., Spec. 05.20.03, Penza, 19 p.

5. Federal'noe agentstvo po tehničeskomu regulirovaniju i metrologii (2009), «Spravochnyj dokument po nailuchshim dostupnym tehnologijam obespečenija jenergojeffektivnosti, available at: <http://www.ippc-russia.org/content/id/ru/207.html>
6. *Rukovodstvo po jenergosbereženiju koncerna Du Pont (SShA)*, Jenergetičeskij menedzhment (1997), Izd-vo «Chuvashija», Nizhnij Novgorod, 223 p.
7. Krylova, N. (1977), «O pogreshnostjah sposobov opredelenija mehanicheskih poter' v dvigateljah vnutrennego sgoranija», *Trudy MvTu*, No. 257, Pp. 59–70.
8. Molodan, A.A. (2011), *Ocenka tehničeskogo sostojanija cilindro-porshnevoj grupy dvigatelja s uchetom razdelenija potokov gazov, prohodjashih v karter*, k.t.n. thesis of diss., Spec. 05.22.20, HNADU, Har'kov, 184 p.
9. Bashirov, R.M., Husainov, V.N. and Minnigaleev, A.M. (2011), *Metodika issledovanija dizelej reguliruemih propuskom vpryska topliva*, BGau, Ufa, 112 p.

Молодан Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукові інтереси:

- комп'ютерне проектування систем контролю;
- сучасні методи ремонту колісних машин.

E-mail: tmirm@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2018.