

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.436.12

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.96.0.107

## РЕАЛІЗАЦІЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПІДХОДУ ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ПУСКУ АВТОМОБІЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

Левченко Д. В.<sup>1</sup>, Грицюк О. В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** У статті висвітлені основні положення щодо організації багатофакторного експериментального дослідження пускових якостей вітчизняного автомобільного дизеля. Описано створену фізичну модель на базі вітчизняного автомобільного вихрокамерного дизеля 4ДТНА. Висвітлені фактично отримані значення обраних шести факторів згідно з прийнятим планом з 77 експериментальних точок.

**Ключові слова:** пуск дизеля, багатофакторне дослідження, експеримент, фізична модель, план експерименту.

**Вступ**

Уже майже 10 років Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ) веде наукове забезпечення реалізації державного інноваційно-інвестиційного проекту «Слобожанський дизель» [1]. На цей час ХНАДУ плідно співпрацює з державним підприємством «Харківський автомобільний завод» (ДП «ХАЗ»), де на етапі тривалих випробувань дослідного зразка двигуна в складі автомобіля сьомий рік здійснюється підконтрольна експлуатація автомобіля ГАЗ-33021 «ГАЗель» (номер державної реєстрації АХ 3668СТ), який 2015 р. було модернізовано первенцем проекту – дизелем 4ДТНА1 (рис. 1). Це дволітровий чотирициліндровий дизель із безпосереднім уприскуванням палива номінальною потужністю 100 к.с. За умови перспективних техніко-економічних та масово-габаритних показників цього дизеля фахівцями ДП «ХАЗ» та ХНАДУ виявлені суттєві зауваження до якості низькотемпературного холодного пуску (ХП) дизеля, а саме зафіксована відсутність надійного пуску в зимовий період експлуатації та надто димна робота дизеля під час його підготовки до сприйняття навантаження.

Ця проблема може бути вирішена завдяки оптимізації параметрів складників системи пуску та автоматизації як процесу пуску, так і холостого ходу. У цьому разі основною вимогою щодо наявної системи пуску є забезпечення надійного пуску від електростартера за умови температури навколишнього середовища до мінус 10 °С без застосування допоміжних засобів передпускової підготовки. Саме такі вимоги прописані в технічному

завданні на розроблення дизеля 4ДТНА1 та саме таке завдання стало складником наукового забезпечення вирішення зазначеної проблеми кафедрою двигунів внутрішнього згоряння ХНАДУ.



Рис. 1. Установка дизеля 4ДТНА1 в моторному відсіку автомобіля ГАЗ-33021 «ГАЗель»

**Аналіз публікацій**

Вивчення світового досвіду з дослідження пускових якостей автомобільного дизеля показує тенденцію до експериментального підходу [2–10], тоді як теоретичне подання процесу пуску через складність математичного описання нестационарних процесів і значної чутливості математичної моделі до зміни вихідних даних не є надійним та вимагає значно більших витрат часу на реалізацію дослідження [11, 12].

Перші спроби науково-технічного підходу до вирішення завдання прискореного пуску автомобільного дизеля зі зменшеною димністю відпрацьованих газів зроблені ще 10 років тому. Так, у роботі [2] описаний перший досвід використання апарату математичного планування експерименту для дослідження пускових якостей автомобільного дизеля, що виявились дуже ефективними протягом проведення дослідження. Концепція зовнішнього навантаження дизеля під час пуску також порушена протягом попередніх досліджень за напрямом, а також висвітлена в роботі [3].

#### Мета та постановка завдання

Метою роботи є формування науково-технічного підходу до створення системи пуску автомобільного дизеля, що дозволить провести її оптимізацію та розробити алгоритм управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно створити план багатofакторного дослідження, розробити та побудувати фізичну модель для проведення експерименту, виконати дослідження та оцінити результати.

#### Науково-технічний підхід до вирішення завдання холодного пуску

Основні результати в прогресі напряму дослідження пускових якостей малолітражного автомобільного дизеля, започаткованого в статті [2], досягнуті останнім часом [3, 4]. Насамперед було створено фізичну модель для експериментальних досліджень пускових якостей дизеля 4ДТНА1 із закладеною в неї можливістю форсування цього двигуна до 120 к.с. Водночас умовою створення такої моделі була можливість вивчення механізму впливу часу прогріву повітря камери згоряння свічкою розжарювання перед пуском на робочий процес у циліндрі двигуна. Усі попередні дослідження [2, 5] зводилися до визначення мінімально необхідної температури нагрівання наконечника свічки розжарювання як джерела каталізаторного запалення палива.

Ці два фактори стали основою для фізичної моделі на авангардному дизелі 4ДТНА з вихрокамernим сумішоутворенням. Саме наявність вихрової камери (рис. 2) дала змогу зменшити ступінь стиснення з 18,5 до перспективних 17–17,5 одиниць [8, 9] та створити ідеальні умови для максимального зростання температури повітряного заряду навколо наконечника свічки розжарювання. Необхідно зазначити, що створити теоретич-

ну розрахункову модель займання палива біля свічки розжарювання, зважаючи на температуру нагрівання наконечника та час попереднього вмикання свічки, на цей час неможливо. Окрім того, є змога тільки припустити, як у кінці такту стиснення за умови зміни частоти обертання колінчастого вала в процесі спроби холодного пуску поведе себе температура в камері згоряння з урахуванням попереднього підігріву від свічки розжарювання. Характеристика такого підігріву перед спробою пуску фізичної моделі дизеля 4ДТНА1 зображена на рис. 3.

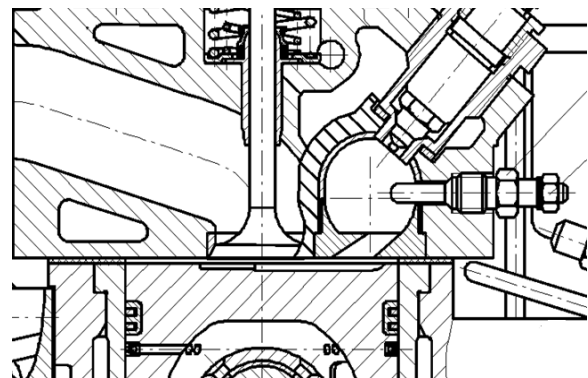


Рис. 2. Ділянка креслення дизеля 4ДТНА з вихровою камерою

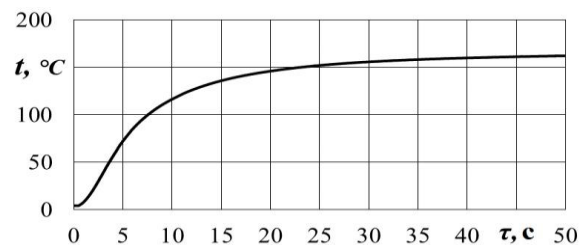


Рис. 3. Підігрів у вихровій камері свічкою розжарювання (поршень у ВМТ)

Ще однією перевагою створеної фізичної моделі є використання спеціального лабораторного механізму, що може змінювати кут випередження упорскування палива в межах 25 градусів кута обертання колінчастого вала (КВ).

І нарешті визначальним складником науково-технічного підходу до вирішення завдання холодного пуску автомобільного дизеля є особливість подання моменту опору двигуна як еквівалентного навантаження від впливу на будь-яке моторне мастило низької температури навколишнього середовища. Складність вирішення такого завдання в умовах важкого доступу до спеціальних кліматичних камер шляхом зміни навантаження

на КВ за рахунок кінематично з'єданого з КВ вала ротора балансірної машини крізь коробку передач вже знайшли своє відображення в попередній статті авторів [3]. Схема моторного стенду ХНАДУ для пускових випробувань фізичної моделі «Слобожанського дизеля» зображена на рис. 4.

Підготовка цілих шести змінних контрольованих параметрів впливу на холодний пуск дизеля та необхідність проведення до-

сити складного експериментально-розрахункового дослідження призвели до здійснення наступного кроку щодо застосування методу математичного планування вивчення ДВЗ, а саме вибору та обґрунтування математичного плану шестифакторного експерименту пускових якостей вітчизняного автомобільного дизеля [4] і розробленню та практичному використанню спеціалізованого програмного комплексу «Approximation\_LSM».

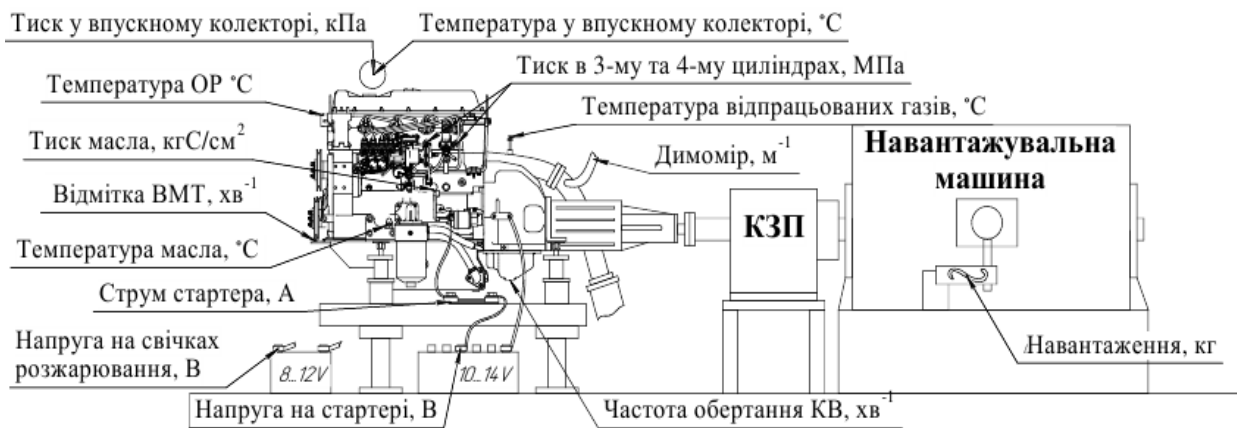


Рис. 4. Вимірювальна схема фізичної моделі дослідження пускових якостей вітчизняного автомобільного дизеля 4ДТНА

#### Підготовка та запис раціонального математичного плану експерименту

На відміну від наявних, новий програмний комплекс «Approximation\_LSM» дозволяє не тільки обробити плани експериментів понад чотирьох факторів, але й дає змогу додавати в план оброблення такі фактичні значення факторів, що навіть теоретично неможливо витримати з точністю попереднього нормування.

Авторам невідомо жодного прикладу запису та подальшої реалізації плану шестифакторного експерименту за умови варіювання факторів на трьох рівнях у галузі машинобудівної інженерії.

Тому наочний приклад запису вимірних (частота прокручування КВ стартером ( $n_{KB}$ ), кут випередження упорскування палива ( $\theta_{KBVII}$ ), час попереднього вмикання свічки ( $\tau_{CP}$ ) та розрахованих (циклова подача палива ( $Q_{ц}$ ), еквівалентна температура ХП ( $t_{екв}$ ), температура свічок розжарювання ( $t_{ср}$ )) параметрів (табл. 1), що визначають якість холодного пуску дизеля, повинен мати неабиякий практичний інтерес.

Таблиця 1 – План-матриця дійсних параметрів холодного пуску

№ з/п	$Q_{ц}$ , мм <sup>3</sup> /цикл	$\theta_{KBVII}$ , град п.к.в.	$t_{екв}$ , К	$n_{KB}$ , хв <sup>-1</sup>	$t_{ср}$ , °С	$\tau_{ср}$ , с
1	28	28	9,6	223,4	1184,6	25,5
2	36	28	8,8	232,4	1194,7	24,7
3	28	12	9,1	232,8	1196,6	24,9
4	36	12	8,4	220,3	1204,8	24,8
5	28	28	0,6	222,4	1202,6	24,9
6	36	28	-0,9	232,5	1171,1	24,6
7	28	12	0,1	226,1	1183,7	25,4
8	36	12	0,6	231,4	1196,8	25,2
9	28	28	8,7	272,2	1196,8	24,3
10	36	28	8,5	277,9	1171,9	25,0
11	28	12	9,9	269,8	1167,6	25,1
12	36	12	9,8	276,1	1178,5	25,2
13	28	28	0,3	275,8	1186,1	25,2
14	36	28	0,0	278,5	1202,8	24,2
15	28	28	8,1	279,5	1196,2	24,7
16	36	12	0,5	257,1	1194,5	27,9
17	28	12	0,9	222,6	1348,8	26,5
18	36	28	8,6	225,1	1350,0	24,6
19	28	28	9,2	224,1	1375,6	24,5
20	36	28	9,9	233,8	1364,7	25,5
21	28	12	9,6	228,1	1358,9	25,3
22	36	28	8,2	231,5	1367,5	24,3
23	28	12	9,2	224,8	1374,4	24,4
24	36	28	8,5	231,4	1368,5	24,7
25	28	28	-0,7	274,3	1371,1	24,9

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
26	35	28	0,2	257,1	1344,4	25,0
27	28	12	-0,8	277,4	1363,1	24,9
28	35	12	0,0	257,0	1346,0	25,1
29	28	28	9,4	279,6	1384,7	25,1
30	36	12	8,2	270,8	1376,1	25,3
31	28	12	9,9	272,0	1387,4	25,3
32	36	12	9,3	270,0	1354,6	24,8
33	28	28	0,5	223,7	1176,2	44,5
34	36	28	0,9	231,8	1175,3	45,1
35	28	12	0,1	224,7	1208,7	45,1
36	36	12	-0,5	229,1	1183,0	44,8
37	28	28	8,1	227,2	1176,3	44,4
38	36	28	8,1	225,5	1186,0	44,6
39	28	28	9,3	226,8	1167,2	44,9
40	36	28	9,9	231,8	1203,3	44,3
41	28	28	9,8	282,0	1190,8	44,9
42	36	28	8,6	274,5	1172,7	44,5
43	28	12	8,2	269,7	1160,8	44,5
44	36	12	8,1	269,2	1186,9	44,5
45	28	28	8,6	280,3	1205,3	44,8
46	36	28	9,0	273,7	1192,3	45,0
47	28	28	9,5	276,0	1198,1	44,7
48	36	28	9,5	273,3	1192,8	44,9
49	28	28	9,1	228,2	1352,4	44,1
50	36	28	0,9	232,0	1347,2	44,1
51	28	28	0,5	221,0	1349,1	45,0
52	36	12	0,2	221,6	1356,3	45,3
53	28	12	-0,4	230,5	1388,0	44,9
54	36	28	9,8	229,1	1373,7	44,6
55	28	28	9,1	232,8	1375,1	45,1
56	36	28	9,7	224,8	1351,7	44,2
57	34	12	8,3	270,9	1262,9	45,4
58	28	12	8,8	270,3	1383,1	44,8
59	36	28	-0,8	269,2	1348,7	45,3
60	28	28	0,2	274,0	1357,7	44,1
61	36	12	-0,6	276,9	1368,9	44,5
62	28	12	-0,1	269,5	1340,8	44,7
63	36	28	10,0	271,5	1358,7	44,9
64	28	28	8,6	271,8	1343,0	44,9
65	36	28	9,4	278,3	1386,8	45,0
66	32	12	9,9	263,7	1277,3	35,1
67	36	28	8,6	244,6	1282,9	34,8
68	36	28	8,4	257,4	1155,4	35,3
69	32	12	8,4	252,5	1282,1	34,5
70	32	28	-1,0	257,4	1277,9	34,9
71	32	28	-0,8	246,1	1254,7	35,0
72	32	12	0,0	223,8	1293,3	34,9
73	32	12	-0,1	272,4	1265,9	35,0
74	32	28	9,1	245,3	1190,8	35,1
75	32	12	8,9	251,2	1389,2	34,6
76	32	28	8,5	252,8	1291,2	24,7
77	32	28	9,3	273,6	1184,6	45,4

Водночас вибір кількості експериментів та вихідні показники якості процесу пуску вже запропоновані авторами в джерелі [4], а запорукою здійснення подальшої успішної оптимізації є вищезазначений розрахунковий апарат.

## Висновки

1. Реалізовано потужний науково-технічний підхід до створення системи пуску автомобільного дизеля на підставі проведення стендових випробувань фізичної моделі двигуна відповідно до плану експериментального дослідження в кількості 77 залікових холодних пусків.

2. Підготовлено цілком конкретний раціональний математичний план шестифакторного експерименту як наочний приклад запису вимірюваних та розрахункових параметрів подальшої оптимізації.

## Література

1. Техніко-економічне обґрунтування необхідності державної підтримки у виконанні інноваційно-інвестиційного проекту «Розроблення та впровадження у виробництво малолітражного автомобільного дизеля потужністю 100–175 к.с. подвійного призначення (Слобожанський дизель)»: монографія / за ред. Ф.І. Абрамчука, О.В. Грицюка, І.А. Дмитрієва. Харків: ХНАДУ, 2012. 164 с.
2. Грицюк А. В. Опыт применения метода планируемого эксперимента в исследованиях переходных процессов пуска дизельного двигателя // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. № 2. С. 53–59.
3. Грицюк О. В., Левченко Д. В. Особенности уявлення моменту опору дизельного двигуна як незалежного фактору впливу на його пускові якості // Двигатели внутреннего сгорания. 2020. № 2. С. 64–73.
4. Левченко Д.В. Вибір та обґрунтування математичного плану 6-ти факторного експерименту при дослідженні пускових якостей ДВЗ // Двигатели внутреннего сгорания. 2021. № 2. С. 86–92.
5. Механізми впливу свечей накалювання на робочий процес в дизельних двигателях / К.В. Корытченко и др. // Системи обробки інформації. 2016. № 6 (143). С. 205–210.
6. Анацький О. О., Бобрицький С. В. Аналіз факторів впливаючих на пускові характеристики дизельних двигунів тепловозів та допоміжних пристроїв для полегшення пуску // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2015. № 1(218). С. 272–276.
7. Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model / Yuanwang Deng, Huawei Liu, Xiaohuan Zhao, Jiaqiang E, Jianmei Chen // Applied Energy. 2018. Vol. 210. P. 279–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.093>.
8. Pacaud P., Perrin H., Laget O. Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements? //

- SAE International Journal of Engines. 2009. Vol. 1. No. 1. P. 831–849.
9. Бондарь В. Н., Малоземов А. А., Кукис В. С. Улучшение пусковых качеств дизеля с пониженной степенью сжатия путем использования электрических подогревателей воздуха на впуске // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 7. С. 22–26.
  10. К вопросу обеспечения надежного пуска дизельных двигателей в условиях низких температур / М. Ю. Манзин, А. А. Заикин, С. В. Рослов, В. В. Иванов // Вестник Сибирской государственной автомобильной академии. 2017. № 3(55). С. 88–94.
  11. Cold-Start Modeling and On-Line Optimal Control of the Three-Way Catalyst / J. Lock, K. Clasen, J. Sjöblom et al // Emiss. Control Sci. Technol. 7. P. 321–347. URL: <https://doi.org/10.1007/s40825-021-00199-x>.
  12. Diesel Cold-Start Emission Control Research for 2015-2025 LEV III Emissions, / G. Neely, J. Sarlashkar, D. Mehta, // SAE Int. J. Engines 6(2). 2013. P. 1009–1020. URL: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1301>.

#### References

1. Abramchuk, F. I., Al'oxin, S. O., Byelov, M. L. et al. (2012). Feasibility study of the need for state support in the implementation of innovation and investment project "Development and implementation in the production of small car diesel with a capacity of 100–175 hp dual-use (Slobozhansky diesel)" [Texniko-ekonomichne obg'runuvannya neobxidnosti der-zhavnoyi pidtry'mky u vy'konanni innovacijno-investy'cijnogo proektu «Rozroblennya ta vprovadzhennya u vy'robny'cztvo malolitrzhnogo avtomobil'nogo dy'zelya potuzhnisty 100–175 k.s. podvijnoho pry'znachennya (Slobozhans'ky'j dy'zel')»], Kharkiv, 164 p.
2. Grytsyuk A. V. (2012). Experience in applying the method of the planned experiment in the study of transient processes of starting a diesel engine [Opyt primenneniya metoda planiruyemogo eksperimenta v issledovaniyakh perekhodnykh protsessov puska dizelnogo dvigatelya], Dvigateli vnutrennego sgoraniya. No. 2, pp. 53–59.
3. Grytsyuk, A. V., Levchenko, D. V. (2020). Peculiarities of presentation of the moment of resistance of the diesel engine as an independent factor of influence on its starting qualities [Osoblyvosti uyavlennya momentu oporu disel'nogo dviguna yak nezalezhnogo faktoruvplyvu na yogo puskovi yakosti], Dvigateli vnutrennego sgoraniya. No. 2, pp. 64–73.
4. Levchenko, D. V. (2021). Selection and justification of mathematical plan 6 of acting experiment in the study of starting qualities of ice [Vybir ta obhruntuvannya matematychnoho planu 6-ty faktornoho eksperymentu pry doslidzhenni puskovykh yakostey avtomobil'nogo dyzelya], Dvigateli vnutrennego sgoraniya, No. 2, pp. 86–92.
5. Korytchenko, K. V., Stahovskiy, O. V., Serpuhov, A. V., Bizony'ch, D. V. (2016). [Mehanizmy vliyaniya svechey nakalivaniya na rabochiy protsess v dizel'nykh dvigateliakh] // Sistem obrobki informatcyi, 2016, No. 6 (143), pp. 205–210.
6. Anatskiy, O. O., Bobrytskyi, S. V. (2015). Analysis of factors affecting starting characteristics and diesel engine assistive devices to facilitate start [Analiz faktoriv vplyvaiuchykh na puskovi kharakterystyky dyzel'nykh dvyhuniv teplovoziv ta dopomizhnykh prystroiv dlia polehshennia pusku] // Visnyk SNU im. V. Dalia, No. 1(218), pp. 272–276.
7. Yuanwang Deng, Huawei Liu, Xiaohuan Zhao, Jiaqiang E, Jianmei Chen (2018). Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model // Applied Energy, Vol. 210, pp. 279–287.
8. Pacaud, P., Perrin, H., Laget, O. (2009). Cold Start on Diesel Engine: Is Low Compression Ratio Compatible with Cold Start Requirements? // SAE International Journal of Engines, Vol. 1, No. 1, pp. 831–849.
9. Bondar', V. N., Malozemov, A. A., Kukis, V.S. (2016). Improving the starting performance of a diesel engine with a reduced compression ratio by using electric inlet air heaters [Uluchshenie puskovykh kachestv dizel'ya s ponizhennoj stepen'ju szhatija putem ispol'zovaniya jelektricheskikh podogrevatelej vozduha na vpuske], No. 7, pp. 22–26.
10. Manzin, M. Yu, Zaikin, A. A., Roslov, S. V., Ivanov, V. V. (2017). To the question of ensuring reliable launch of diesel engines in the conditions of low temperatures [K voprosu obespecheniya nadezhnogo puska dizel'nykh dvigatelej v usloviyakh nizkikh temperatur] // Vestnik SibADI, No. 3(55), pp. 88–94.
11. Lock, J., Clasen, K., Sjöblom, J. et al (2021). Cold-Start Modeling and On-Line Optimal Control of the Three-Way Catalyst. Emiss. Control Sci. Technol., 7, pp. 321–347.
12. Neely, G., Sarlashkar, J., Mehta, D. (2013). Diesel Cold-Start Emission Control Research for 2015-2025 LEV III Emissions // SAE Int. J. Engines, 6(2), pp. 1009–1020.

**Левченко Денис Вадимович<sup>1</sup>**, асп. каф. двигунів внутрішнього згорання, тел. +38 099-985-84-99, [denislev4enko@gmail.com](mailto:denislev4enko@gmail.com),

**Грицюк Олександр Васильович<sup>1</sup>**, д.т.н., проф. каф. двигунів внутрішнього згорання, тел. +38 050-323-12-80, [dthkbd@ukr.net](mailto:dthkbd@ukr.net).

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

## Implementation of Scientific and Technical Approach to the Automotive Diesel Starting System Creation

**Abstract. Problem.** This article indicates a way to solve the problem of complicated cold start and high smoky operation in preparation for accepting the load of a domestic diesel engine 4DTNA1 with direct fuel injection by optimizing the parameters of the components of the start-up system and automating the start-up and idling processes according to rational control algorithms. According to the necessity solving this problem, requirements have been formulated for organizing and conducting a multifactorial experimental study of the starting qualities of an automobile diesel engine. **Goal.** The main goal of the work is to form a scientific and technical approach to creating a system for starting a vehicle diesel engine, which will optimize its component's properties and develop control algorithms. To achieve this goal it is necessary to create a plan of multifactorial research, develop and build a physical model for experimental research, perform research and evaluate the results. **Methodology.** The main provisions on the organization of a multifactorial experimental study of the starting qualities of an automobile diesel engine are highlighted. Design of experiments method used when creating a plan for experimental research. **Results.** The features and advantages of the created physical model in relation to traditional solutions for studying the starting qualities of automobile engines, including the control of an external load to reproduce the impact on engine oil of low temperature in conditions of difficult access to climatic chambers, are presented. The choice of a vortex-dimensional

sample of a physical model for conducting start-up studies through a promising, reduced by 1-1.5 units, compression ratio and the possibility of a qualitative study of the effect of pre-start heating of the volume of the combustion chamber with a glow plug on starting parameters. **Originality.** The actual values of the selected 6 most influential linearly independent factors on the start-up process during the experimental study according to the accepted plan of 77 test cold starts are indicated. It is noted that the actual result of establishing certain controllable factors is random with a certain error in the vicinity of the exact value in accordance with the orthogonal plan of the experiment. Such a variation of real values requires the use of a special mathematical apparatus, implemented by the authors in the Approximation LSM software product, when analyzing the results of a 6-factor experimental study. **Practical value.** A rational mathematical plan of a six-factor experiment has been prepared as a clear example of recording the measured and calculated parameters of the next optimization.

**Key words:** diesel engine start, multifactorial study, experiment, physical model, design of experiment.

**Levchenko Denis**<sup>1</sup>, Grad. student, Internal Combustion Engines Department, tel. +38 099-985-84-99, denislev4enko@gmail.com,

**Grytsyuk Oleksandr**<sup>1</sup>, Doct. of Science, Doct. of Eng., Prof. Internal Combustion Engines Department, tel. +38 050-323-12-80, dthkbd@ukr.net,

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

---