

Викиди оксидів азоту при використанні дизельного біопалива*(Представлено д.т.н., проф. Кравченко О.П.)*

Внаслідок глобального потепління на планеті зростає роль використання альтернативних палив. Дизельне біопаливо (біодизель) зменшує викиди сажі у порівнянні з дизельним паливом і покращує баланс вуглекислого газу на планеті. Використання біодизелю у двигунах внутрішнього згоряння, як правило, показує вищі викиди оксидів азоту, ніж дизельне паливо. В роботі приведені рівняння формування оксидів азоту, які можуть утворюватися, в основному, за допомогою трьох механізмів; термічного, швидкого і формування закису азоту. Приведені також характерні коефіцієнти кінетики процесу для дизельного і біодизельного палив.

В роботі проаналізовані викиди оксидів азоту для біодизельних палив, що вироблені з соєвої олії, талової олії і використаної олії. Показана залежність викидів оксидів азоту від ступеня ненасиченості молекул. Біодизель на основі соєвої олії показав більше викидів оксидів азоту при згорянні, оскільки містить у своєму складі більше ненасичених молекул (молекул з подвійними зв'язками).

Зменшити викиди оксидів азоту можна шляхом рециркуляції відпрацьованих газів. Одержана емпірична формула для описання викидів оксидів азоту для сумішей дизельного і біодизельного палив, що дає гарне узгодження з експериментальними даними для низькотемпературного згоряння в умовах рециркуляції відпрацьованих газів.

Ключові слова: автомобільний транспорт; дизельне біопаливо; небезпечні викиди автомобілів; оксиди азоту.

Постановка проблеми. Внаслідок глобального потепління на планеті зростає роль використання альтернативних палив, одним із яких є дизельне біопаливо. Дизельне біопаливо або, як ще його часто називають «біодизель», зменшує викиди сажі у порівнянні з дизельним паливом і покращує баланс вуглекислого газу на планеті за рахунок того, що паливо виробляється з рослин, які поглинають вуглекислий газ, коли ростуть. Основні проблеми використання дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння і в транспорті – це його підвищена в'язкість і також, як правило, збільшені викиди оксидів азоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичне і експериментальне дослідження викидів оксидів азоту при використанні дизельного палива та біопалива розглянуто в роботах [1–11]. Аналіз викидів оксидів азоту при використанні біодизельного палива зроблений у роботі [8].

В дослідженні [6] були проаналізовані відпрацьовані гази трьох типів біодизельних палив з використанням аналізатора оксидів азоту та газового хроматографа і були знайдені залежності викидів від властивостей палива. Моделювання викидів з використанням методів штучних нейронних мереж показало, що біодизель, який містить більше ненасичених жирних кислот, викидає більше NO_x , ніж біодизель з більш насиченими жирними кислотами. З парного t-тесту було показано, що чисті біодизельні палива значно зменшили утворення NO_x у порівнянні з дизельними [6]. Слід враховувати, що в роботі використовувалася нова стратегія, відома як низькотемпературне згоряння («low temperature combustion», LTC), що буде сприяти більшому використанню екологічно чистих дизельних двигунів.

Програмне забезпечення, що використовується для моделювання згоряння дизельного палива і біопалива, досить складне і потребує використання суперкомп'ютерів. Для нових видів палив потрібно поряд з детальними моделями створювати також і прості моделі, за допомогою яких можна швидко виконати моделювання. Наприклад, нам вдалося описати процес розпилювання дизельного біопалива за допомогою нескладної LP –моделі [3].

Мета дослідження. Метою дослідження є одержання простої кореляційної залежності, яка б допомогла спрогнозувати викиди оксидів азоту для нової генерації дизельних біопалив.

Викладення основного матеріалу.

1. Формування оксидів азоту. Оксиди азоту в полум'ї в основному утворюються за допомогою трьох механізмів; термічного, швидкого і формування закису азоту. Термічний механізм базується на розширеному механізмі Зельдовича [11]:



Швидкий механізм важливий, коли температура згоряння настільки низька, що робить термічний механізм незначним, або ж коли присутній азот, що зв'язаний з паливом. Згідно цього механізму, паливо внаслідок піролізу утворює вуглеводневі радикали, які взаємодіють із азотом і окиснюються у полум'ї до NO_x та інших часток. Швидкий механізм можна описати, наприклад, наступним рівнянням [11]:



Механізм утворення закису азоту (N₂O) важливий за низьких температур і описується термомолекулярною реакцією:



з подальшим розпадом на NO.

Кінетику системи C/H/N можна описати за допомогою рівняння Арреніуса, яке показує коефіцієнти швидкості реакцій:

$$k = AT^{\beta} \exp(-E/R_0T); \quad (6)$$

де E – енергія активації; R_0 – газова постійна; T – температура, К; A та β – постійні.

В таблиці 1 показані коефіцієнти для трьох реакцій термічного механізму [11].

Таблиця 1

Коефіцієнти швидкості для термічного механізму NO

	Реакція	A	β	E/R_0	Автори
R1	$\text{N}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$	1.6E + 13	0	0	Heywood, 1988
		3.3E + 12	0,3	0	Stone, 1999
		3.8E + 13	0	370	Stone, 1999
R2	$\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$	6.4E + 09	1	3150	Heywood, 1988
		6.4E + 09	1	3160	Stone, 1999
		1.6E + 10	1	4470	Stone, 1999
R3	$\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$	4.1E + 13	0	0	Heywood, 1988
		3.8E + 13	0	0	Stone, 1999
		5.4E + 13	0	1720	Stone, 1999

Таким чином, наприклад, для термічного виходу NO можна застосувати наступне рівняння [8]:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k[\text{O}][\text{N}_2],$$

де $[\text{NO}]$ – концентрація окислу азоту;

$[\text{O}]$ – концентрація атомарного кисню;

$[\text{N}_2]$ – концентрація молекул азоту;

k – коефіцієнт швидкості реакції.

2. Формування оксидів азоту у випадку використання біодизельного палива. При згорянні біодизельного палива, також як і дизельного, можливі шість механізмів утворення оксидів азоту [6]. Три з них описані вище: термічний (Зельдовича), швидкий та механізм N₂O. Крім того оксиди азоту можуть утворюватися ще за паливним механізмом та механізмом NNH [9]. Як досліджено в роботі [6], домінуючими механізмами утворення NO_x при згорянні біодизеля є термічні та швидкі реакції.

Атмосферний або молекулярний азот є основним джерелом азоту при утворенні NO_x при звичайному спалюванні типових нафтових та біологічних палив. В середньому біодизель має концентрацію азоту всього 0,02 % [6]. Основний шлях формування NO_x тут передбачає створення проміжних азотовмісних сполук, таких як HCN, NH₃, NH або CN. Ці молекули потім можуть бути окиснені і утворити NO_x. Формування NO_x завдяки N₂O є ще одним важливим механізмом процесу згоряння під високим тиском і низьким співвідношенням повітря-паливо в порівнянні з швидким механізмом та незначним внеском у формування NO_x у порівнянні з термічним механізмом [6].

Для коефіцієнтів швидкості реакції можна використовувати те ж саме рівняння Ареніуса, що і для дизельного палива:

$$k = AT^B \exp(-E_a/R_0T). \quad (7)$$

Реакції та коефіцієнти для біодизельних палив, що досліджені в роботі [6], представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Реакції утворення оксидів азоту та коефіцієнти рівняння (7) для біодизельного палива

	Реакція	A, см ³ / моль / с	B	E _a , калорія/моль
N1	$\text{CH} + \text{N}_2 = \text{HCN} + \text{N}$	3.12E + 09	0.90	20130
N2	$\text{N} + \text{O}_2 = \text{NO} + \text{O}$	9.00E + 09	1.00	6500
N3	$\text{N} + \text{OH} = \text{NO} + \text{H}$	3.36E + 13	0.00	385
N4	$\text{HO}_2 + \text{NO} = \text{NO}_2 + \text{OH}$	2.11E + 12	0.00	-480
N5	$\text{HCN} + \text{OH} = \text{NH}_2 + \text{CO}$	5.96E + 05	3.20	8210
N6	$\text{NH}_2 + \text{O} = \text{H}_2 + \text{NO}$	3.90E + 13	0.00	0

Серед різних механізмів формування NO_x , які показані в таблиці 2, найбільш важливою є перша реакція $\text{N1: CH} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN} + \text{N}$, яка має меншу енергію активації, ніж термічні реакції NO_x . Крім того, атоми кисню, пов'язані з одним атомом вуглецю в складі метилового ефіру, призводять до збільшення утворення CO/CO_2 . Нарешті, подвійний зв'язок в метиловому ефірі призводить до високої температури горіння [6] та, можливо, до збільшення термічного утворення NO_x . Тому в дослідженні моделювання роль метилового ефіру у формуванні підвищеного NO_x є дуже важливою і відповідно включена в механізм горіння.

Ненасичені молекули показують вищу температуру адиабатичного полум'я, ніж насичені молекули. З теоретичної точки зору це має значити, що біодизель повинен би мати вищу температуру полум'я, ніж звичайне дизельне паливо через більший відсоток ненасичених молекул у складі біодизеля [8]. Присутність кисню в біодизельному паливі (біля 11 %) також вважається однією з причин збільшення викидів NO_x [2, 6].

На рисунку 1 представлені середні значення викидів оксиду азоту з п'яти експериментальних наборів даних, побудованих з врахуванням їх стандартного відхилення [6]. У випадку згоряння дизельного палива (ULSD), через наявність більшої кількості вуглецю (що означає більшу теплотворну здатність), ніж у біодизельного палива, висока температура горіння може бути більш впливовим параметром формування NO_x , ніж при згорянні біодизеля. Аналіз показує, що індикатором утворення NO_x буде наявність жирних кислот (C18: 1–C18:3). Цей висновок легко представлений в результатах NO_x для SME (метиловий ефір соєвої олії), TO (талова олія) та WCO (олія, що вже була у вжитку). TO та WCO показали менше NO_x , ніж SME, що має найбільшу кількість лінолевої кислоти (C18: 2 або більше кількості подвійних зв'язків) (табл. 3).

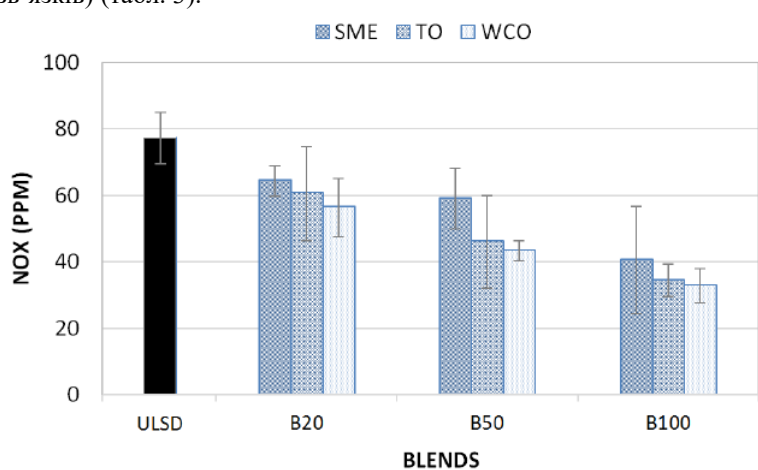


Рис. 1. Варіація викидів NO_x відповідно до їх ступеня ненасиченості при LTC [6]

На відміну від результатів інших дослідників, роботи яких проаналізовані в [2], на рисунку 1 викиди оксидів азоту менші у біодизельного палива, ніж у дизельного. На нашу думку, причина цьому – в застосуванні стратегії низькотемпературного згоряння. Ця стратегія забезпечує викиди NO_x від двигунів шляхом рециркуляції деяких відпрацьованих газів назад у циліндри двигуна, внаслідок чого тепло поглинається від згоряння через ефект розведення. Метод, який називається «рециркуляція відпрацьованих газів» (EGR), виявився дуже ефективним та практичним методом зниження NO_x , що відбувається внаслідок зниження температури горіння [1]. За низькотемпературного згоряння викиди оксидів азоту для біодизельних палив виявились меншими, ніж для дизельного палива.

3. Моделювання викидів оксидів азоту.

В таблиці 3 показана структура олій, з яких виготовляється біодизельне паливо, та частка метилових ефірів у структурі палива. Дані приведені для біодизельних палив (SME, WCO і TO), що взяті з роботи [6] у порівнянні з біодизельними паливами (HME1 та HME2) на основі конопляної олії, що взяті з роботи [3].

Як бачимо з таблиці 3, біодизельні палива на основі конопляної олії (HME1 та HME2) показують більший відсоток ненасичених кислот (тих, що мають подвійні зв'язки) у своєму складі, ніж біодизель на основі соєвої олії. Якщо при виробництві біодизельного палива HME1 замінити молекули C18:1–C18:3 на молекулу C18:0, тоді ми збільшимо ступінь молекул насиченості біопалива до 97 %.

В роботі [10] показано, що за умови однакового часу впрорскування, молекули з довгими ланцюжками жирної кислоти мали більші викиди оксидів азоту, ніж молекули з короткими ланцюжками. Деякі молекули мають тенденцію утворювати більші викиди як частинок, так і оксидів азоту. Наприклад, це спостерігалось у випадку ненасичених молекул (з подвійними зв'язками), коли як NO_x , так і викиди частинок збільшувалися зі збільшенням ступеня ненасиченості [10].

Хімічні формули жирних кислот та відсотки компонентів (чистих метилових ефірів) у біодизельних паливах

Жирні кислоти/ Хімічна формула	*Хімічна структура жирних кислот	SME [6]	WCO [6]	TO [6]	HME1 [3]	HME2 [3]
Лаурінова/C12H24O2	C12:0	0,1		0,1		
Мірістічна/C14H28O2	C14:0	0,1	0,9	2,8		
Пальмітинова/C16H34O2	C16:0	10,2	20,4	23,3	6,1	6,0
	C16:1				0,3	
Стеаринова/C18H38O2	C18:0	3,7	4,8	19,4	2,1	2,5
Олеїнова/C18H36O2	C18:1	22,8	52,9	42,4	12,0	12,0
Лінолева/C18H34O2	C18:2	53,7	13,5	2,9	56,9	55,0
Ліноленова/C18H32O2	C18:3	8,6	0,8	0,9	20,6	20,0
	C20:0					0,5
	C20:1					1,0
	C22:1				0,2	1,0
Інші					1,1	0,5
Всього насичених		14,1	26,1	45,6	9,3	9,5
Всього ненасичених		85,1	67,2	46,2	90,0	89,0

Довідка*: Показано кількість атомів вуглецю, що міститься в молекулі (після букви «С»), а також кількість подвійних зв'язків (після «:»)

Як показали експерименти, поліненасичений метиловий ефір (C18:3) виробляє найбільшу кількість оксидів азоту, що ще раз підтверджує той факт [10], що молекули з більшою затримкою займання виробляють більшу кількість оксидів азоту. Отже, експерименти доводять, що викиди азоту збільшуються зі збільшенням кількості подвійних зв'язків, якщо затримка займання не змінюється спеціально.

Як відомо, за постійного навантаження (чи то буде фіксований початок впорскування, чи початок згоряння), затримка займання корелює з викидами NO_x . Але механізм цього впливу ще не зовсім зрозумілий. Оптична діагностика [10] показала, що оксиди азоту формуються не на ранніх швидких стадіях згоряння («premixed combustion phase»), а на пізній стадії дифузійного згоряння. Деякі дослідники вважають, що коли відбувається швидке згоряння при збагачених паливах і низьких температурах, то одержується багато викидів оксидів азоту. В деяких випадках було показано, що коли більша доля палива згорає при швидкому початковому режимі згоряння, це може привести до підвищення глобальної температури газу в циліндрі, що приводить до більшого формування оксидів азоту. Якщо автомобіль не використовує EGR, то викиди оксидів азоту при використанні біодизельного палива порівняно з дизельним паливом в основному будуть більшими. Для важких вантажівок (без рециркуляції відпрацьованих газів, EGR,) з довірчим рівнем 95 % викиди оксидів азоту (NO_x) можна знайти за формулою [7]:

$$\frac{NO_x}{NO_{xD}} = e^{0.0009794 \% B} \quad (8)$$

Було одержано формулу для викидів оксидів азоту (NO_x) з використанням EGR. Для біодизельного палива з соєвої олії (SME) та сумішей дизельного та біодизельного палив ці викиди добре описуються наступною формулою:

$$NO_x = NO_{xD} e^{-0.007 \% B}, \quad (9)$$

де B – відсоток біодизельного палива у суміші.

Порівняння результатів моделювання за формулою (9) та результатами експериментів [6] показані на рисунку 2.

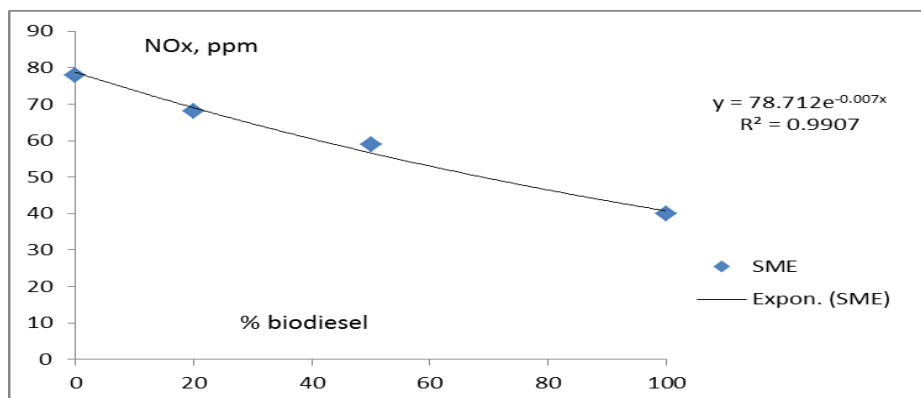


Рис. 2. Викиди оксидів азоту NO_x для біодизельного палива на основі рівняння (9) порівняно з результатами експериментів [6]

Значний вплив на викиди NO_x має в'язкість палива. В роботах [5, 6] проаналізовано викиди NO_x як функцію в'язкості і виявлено збільшення NO_x з підвищенням в'язкості при низьких температурах. Взагалі кінематична в'язкість біодизеля більша, ніж у дизельного палива, що зменшує виток палива під час впорскування і призводить до підвищення тиску, а також до просунутого часу впорскування. Просування часу впорскування сприяє збільшенню маси палива, що вводиться, що, у свою чергу, призводить до збільшення викидів NO_x . Отже, дослідження [5,6] показали зниження викидів NO_x приблизно на 3,52 % при зниженій в'язкості соєвого метилового ефіру до рівня нафтового дизельного палива.

У роботі [6] доведено, що NO_x збільшується зі збільшенням поверхневого натягу палива. За даними [3] поверхневий натяг біодизельного палива на 22 % більший, ніж дизельного палива. Біодизельне паливо показує більші середні діаметри крапель при розпилюванні (SMD), це фактор гіршого розпилювання палива. Однак, це знижує тертя палива в швидкій фазі згоряння і веде до збільшення дифузійної фази згоряння палива, що збільшує викиди NO_x [6].

В роботі [5] показано, що велика кількість молекул C16 та C18 у складі біодизельного палива може покращити течію палив і зменшити кінематичну в'язкість. Присутність легких вуглеводнів в паливі може знизити відкладення та точку займання. При збільшенні об'ємного відсотку біодизельного палива в суміші (від 0 до 100 %) температура згоряння і тиск зростають лінійно, пропорційно до вмісту біодизеля. Високий відсоток біодизельного палива в суміші покращує згоряння і приводить до вищого тиску і вищої температури реакцій.

Експериментальні дослідження оксидів азоту біодизельного палива з використаною олії у ДВЗ без EGR в г/(кВт год.) за даними Murillo [3] показані на рисунку 3.

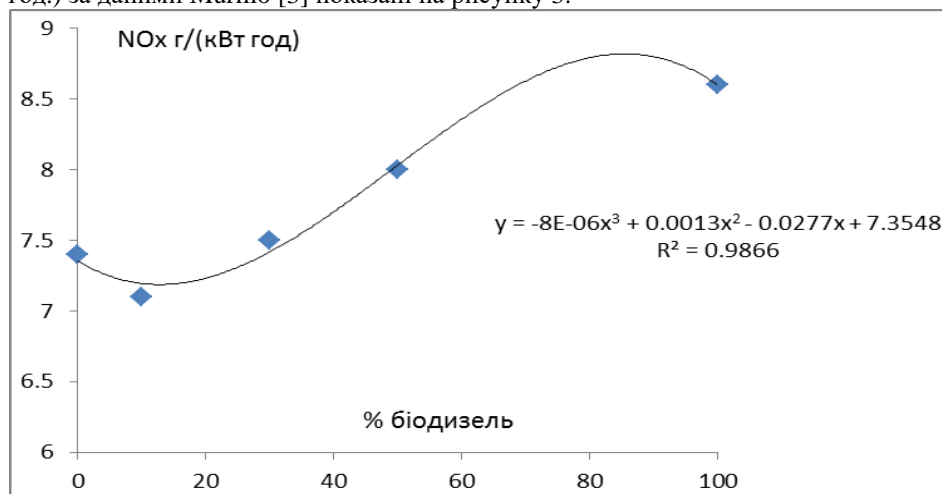


Рис. 3. Експериментальні викиди оксидів азоту NO_x г/(кВт год.) за даними Murillo для біодизельного палива з використаною олії, що приведені в [3]

Як видно з рисунка 3, в основному, ми маємо збільшення викидів NO_x зі збільшенням відсотку біодизельного палива у суміші. Але тільки суміш з 10 % біодизельного палива (B10) показує зменшення оксидів азоту, в порівнянні з дизельним паливом. Цей факт можна як раз і пояснити меншим значенням поверхневого натягу, який має суміш B10, на що вказано, наприклад, у роботі [3].

Отже, для зменшення оксидів азоту біодизельного палива, можна рекомендувати використання EGR або ж обмежитися 10 % сумішшю біодизельного палива і дизельного.

Висновки:

Використання біодизельного палива у двигунах внутрішнього згоряння, як правило, показує вищі викиди оксидів азоту. Зменшити викиди оксидів азоту можна шляхом рециркуляції відпрацьованих газів.

В роботі описані механізми формування оксидів азоту і приведені характерні коефіцієнти кінетики процесу для дизельного і біодизельного палив.

Одержана емпірична формула для описання викидів оксидів азоту для сумішей дизельного і біодизельного палив, що дає гарне узгодження з експериментальними даними для низькотемпературного згоряння в умовах рециркуляції відпрацьованих газів.

У подальшому необхідно виконати моделювання викидів оксидів азоту біодизельного палива на основі конопляної олії з оптимізованим молекулярним складом палива.

Список використаної літератури:

1. Гутаревич Ю.Ф. Розрахункові дослідження впливу рециркуляції відпрацьованих газів на утворення оксидів азоту при застосуванні комбінованого методу регулювання потужності сучасного бензинового двигуна / Ю.Ф. Гутаревич, С.В. Карев // Вісник НТУ. – К. : НТУ. – 2012. – Вип. 26., – С. 133–138.

2. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння : монографія / Р.В. Колодницька. – Житомир : ЖДТУ, 2018. – 192 с.
3. Колодницька Р.В. Розпилювання дизельного палива та біопалива у двигунах внутрішнього згоряння : монографія / Р.В. Колодницька. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 210 с.
4. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals / J.B. Heywood. – New York : McGraw-Hill, 1988. – 390 p.
5. Kumar A. Combustion Chemistry of Biodiesel for Use in Urban Transport Buses: Experiment and Modeling / A.Kumar, Kim D-S. Omidvarborna H., S.K. Kuppili // MNTRC, Mineta National Transit Research Consortium. – 2014, Access mode : transweb.sjsu.edu/mntrc/index.html.
6. Experimental Modeling of NOx and PM Generation from Combustion of Various Biodiesel Blends for Urban Transport Buses / A.Kumar, D-S. Kim, H.Omidvarborna, M.Yarlagadda, S.K. Kuppili, N.M. Sawtarie // MNTRC Project 1245. – The University of Toledo. – 2016. – 80 p., Access mode : transweb.sjsu.edu/project/1245.html.
7. Lapuerta M. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions / M.Lapuerta, O.Armaz, J.Rodriguez-Fernandez // Progr Energy Combust Sci. – 2008 – № 34. – P. 198–223.
8. Mueller C.J. An experimental Investigation on the Origin of Increasing NOx Emissions When Fuelling a Heavy-Duty Compression Engine with Soy biodiesel / C.J. Mueller, A.L. Boehman, G.S. Martin // SAE. 2009-01-1792. – 2009. – Pp. 1–28.
9. Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches / S.M. Palash, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, B.M. Masum, I.M. Rizwanul Fattah, M.Mofijur // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – № 23. – P. 473–490.
10. The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion / A.Schonborn, N.Ladommatos, J.Williams, R.Allan, J.Rogerson // Combustion and Flame. – 2009. – № 156. – P. 1396–412.
11. Stone R. Introduction to Internal combustion Engines / R.Stone. – Third Edition. Antony Rowe Ltd : Chippenham, 1999. – 641 p.

References:

1. Gutarevych, Y.F. and Karev, S.V. (2012), «Rozrahunkovi doslidzenya vplivu recerkuluatsiji vidpratsyovanyh gaziv na utvorenya oksydiv azotu pry zastosuvanni kombinovanog metodu regulyuvannya potuznosti suchasnogo benzinovogo dvyguna», *Visnyk NTU*, No. 26, Pp. 133–138.
2. Kolodnyc'ka R.V. (2018), *Procesy vyparovuvannya ta zgoryannya dyzel'nogo biopalyva u dvygunah vnutrishhnjogo zgoryannya: monograf*, ZDTU, Zhytomyr, 192 p.
3. Kolodnyc'ka, R.V. (2017), *Rozpilyuvannya dyzel'nogo palyva ta biopalyva u dvygunah vnutrishhnjogo zgoryannya, monografiya*, ZDTU, Zhytomyr, 210 p.
4. Heywood, J.B. (1988), *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 390 p.
5. Kumar, A., Kim, D-S. Omidvarborna H. and Kuppili, S.K. (2014), *Combustion Chemistry of Biodiesel for Use in Urban Transport Buses: Experiment and Modeling*, Mineta National Transit Research Consortium, available at: transweb.sjsu.edu/mntrc/index.html
6. Kumar, A., Kim, D-S, Omidvarborna, H., Yarlagadda, M., Kuppili, S.K. and Sawtarie, N.M. (2016), *Experimental Modeling of NOx and PM Generation from Combustion of Various Biodiesel Blends for Urban Transport Buses*. MNTRC Project 1245, The University of Toledo, available at: transweb.sjsu.edu/project/1245.html
7. Lapuerta, M., Armas, O. and Rodriguez-Fernandez, J. (2008), «Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions», *Progr Energy Combust Sci*, No. 34, pp. 198–223.
8. Mueller, C.J., Boehman, A.L. and Martin, G.S. (2009), «An experimental Investigation on the Origin of Increasing NOx Emissions When Fuelling a Heavy-Duty Compression Engine with Soy biodiesel», *SAE 2009-01-1792*, Pp. 1–28.
9. Palash, S.M, Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Masum, B.M., Rizwanul Fattah, I.M. and Mofijur, M. (2013), «Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 23, Pp. 473–490.
10. Schonborn, A., Ladommatos, N., Williams, J., Allan, R. and Rogerson, J. (2009), «The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl esters on diesel combustion», *Combustion and Flame*, No. 156, Pp. 1396–1412.
11. Stone, R. (1999), *Introduction to Internal combustion Engines*, Third Edition, Antony Rowe Ltd. Chippenham, 641 p.

Колодницька Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- альтернативні палива та біопалива для автомобільного транспорту;
- розпилювання, випаровування та згоряння палива у ДВЗ;
- шкідливі викиди автомобільного транспорту.

E-mail: ruslanakolod2017@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2018.