

С. В. Цимбал<sup>1</sup>  
О. О. Галушак<sup>1</sup>  
А. П. Полив'ячук<sup>1</sup>  
Д. О. Галушак<sup>1</sup>  
О. В. Цимбал<sup>1</sup>

## ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИЗЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА РЕГУЛЮВАННЯМ КУТА ВИПЕРЕДЖЕННЯ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Розглянуто вплив використання біодизельного палива на робочі процеси дизельного двигуна та його еколого-енергетичні показники. Процес впорскування палива має значний вплив на ефективність згорання паливно-повітряної суміші. В залежності від кута випередження впорскування, тиск та температура повітря в циліндрах двигуна під час впорскування палива змінюються. На період затримки самозаймання паливо-повітряної суміші впливають властивості палива та кут випередження його впорскування. Використання біодизельного палива потребує зміни значення циклової подачі палива та зменшення періоду затримки самозаймання паливо-повітряної суміші. Зміни фізико-хімічних властивостей суміші палив вимагають адаптації параметрів впорскування.*

*Проаналізовано вплив біодизельного палива та його суміші з дизельним паливом на різні фази робочого циклу дизеля. Для аналізу виокремлено такі фази як впорскування, згорання і розширення, з періодом затримки самозаймання включно, період швидкого горіння, період повільного горіння і період розширення газів. Зазначається, що фізико-хімічні властивості біодизельного палива впливають на процеси впорскування, випаровування та горіння палива в циліндрах двигуна. Використання біодизельного палива потребує змін: діаметра крапель палива, що впорскується, далекобійності струменя палива, інтенсивності горіння та інших параметрів. Ці зміни зокрема впливають на тривалість кожної фази такту згорання і розширення. Регулювання вмісту біодизельного палива в суміші палив та зміна кута випередження впорскування дозволяє впливати на вказані процеси.*

*Експериментальні дослідження виконано на дизельному генераторі з двигуном СМД-15Э за різних співвідношень дизельного та біодизельного палив у суміші. В результаті проведених експериментів визначено оптимальні значення кута випередження впорскування для різних сумішей палив. Після опрацювання результатів досліджень визначено необхідні значення зміни кута випередження впорскування в залежності від складу суміші палив з метою мінімізації енергетичних затрат на виконання корисної роботи.*

**Ключові слова:** біодизельне паливо, дизельний двигун, паливна суміш, кут випередження впорскування.

### Вступ

Забезпечення безперебійної подачі електроенергії, зокрема в об'єкти критичної інфраструктури урбанізованих територій є обов'язковою вимогою їхнього функціонування. Це питання вирішується встановленням дизельних генераторів, потужність яких може варіюватись від 6...8 до сотень кВт. Для підвищення еколого-енергетичних показників автономних джерел енергії, які застосовуються як резервне або постійне джерела енергії, доцільно використовувати біодизельне паливо або його суміш з дизельним [1]. При цьому необхідно забезпечувати ефективний перебіг робочих процесів в циліндрах двигуна, остільки тільки за умови забезпечення повного згорання палива можливе поліпшення показників двигуна. Одним з вагомих факторів, який впливає на перебіг робочих процесів в циліндрах двигуна є кут випередження впорскування палива.

## Результати дослідження

Процес впорскування палива в циліндри двигуна має значний вплив на організацію ефективного згорання паливно-повітряної суміші. В залежності від кута випередження впорскування, тиск та температура повітря в циліндрах двигуна під час впорскування палива буде змінюватись. З наближенням поршня до верхньої мертвої точки, тиск та температура будуть збільшуватись, що полегшуватиме процес самозаймання паливо-повітряної суміші в камері згорання. На період затримки самозаймання паливо-повітряної суміші впливають властивості палива та кут випередження його впорскування. Використання біодизельного палива викликає необхідність зміни значення циклової подачі палива та зменшення періоду затримки самозаймання паливо-повітряної суміші. Зі збільшенням вмісту біодизельного палива в суміші його з дизельним паливом має зрости циклова подача та зменшитись період затримки самозаймання паливо-повітряної суміші, відповідно кут випередження впорскування потрібно зменшувати [2].

Екологічні та техніко-економічні показники автомобіля залежать переважно від того, наскільки повно використовується енергія згорання палива в циліндрах двигуна [3]. Отже, для якомога ефективного використання біодизельного палива необхідно проаналізувати, яким чином його фізико-хімічні властивості впливають на перебіг робочих процесів, а також врахувати їх під час налаштування автомобільного двигуна для роботи на суміші палив.

Розглянемо детальніше вплив використання біопалива на перебіг робочих процесів дизельного двигуна. Аналіз фізико-хімічних властивостей біодизельного палива продемонстрував, що вони практично не впливають на такти впуску, стиснення й випуску, а мають максимальний вплив на такт згорання і розширення.

Для займання робочої суміші сприятливі умови створюються під час такту стиснення. В дизелях наприкінці такту стиснення температура сягає 600...700 °С. Завдяки цьому в циліндрах двигуна виникають сприятливі умови для гарантованого займання біодизельного палива.

Згорання паливо-повітряної суміші та розширення продуктів згорання відбувається під час такту згорання та розширення. Тривалість цього такту можна розділити на декілька окремих фаз: період утворення зон горіння (також відомий як період затримки самозаймання); період розповсюдження полум'я по всьому об'єму горіння (період швидкого горіння); власне, сам період горіння (період повільного горіння); завершальним є період розширення робочих газів.

Для чіткого визначення впливу фізико-хімічних властивостей біодизельного палива на такті згорання та розширення необхідно окремо проаналізувати особливості перебігу кожної з фаз такту. На розгорнутій індикаторній діаграмі (рис. 1) показано процес зміни тиску в циліндрі двигуна в залежності від кута п.к.в.

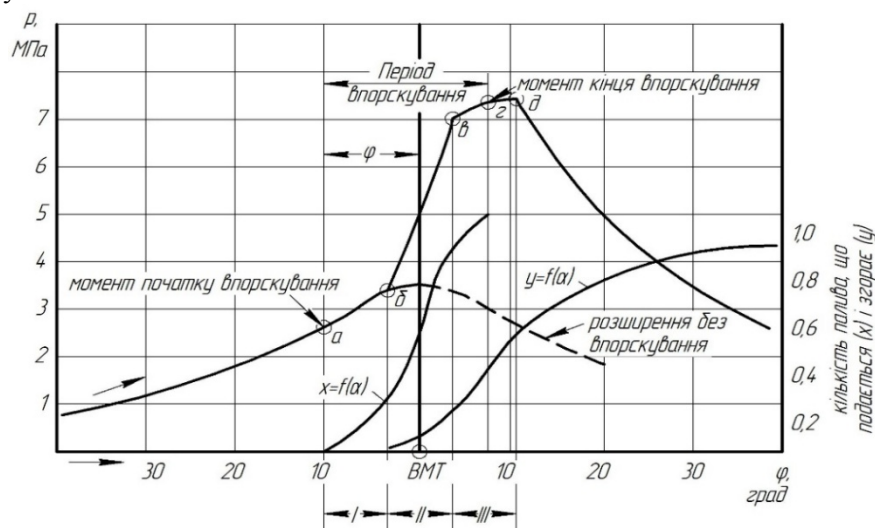


Рис. 1. Розгорнута індикаторна діаграма дизеля

На діаграмі наведені фази перебігу такту згорання та розширення:

1. Фаза I (відрізок від точки *a* до точки *б*) — період утворення окремих зон горіння, або ж період затримки самозаймання;
2. Фаза II (відрізок від точки *б* до точки *в*) — період розповсюдження полум'я по всьому об'єму горіння, так званий період швидкого горіння;

3. Фаза III (відрізок від точки  $\epsilon$  до точки  $\delta$ ) — період горіння, ще відомий як період повільного горіння;

4. Фаза IV (відрізок на діаграмі від точки  $\delta$  до початку відкриття випускних клапанів) — період розширення робочих газів.

Тепер розглянемо детально вплив фізико-хімічних властивостей біодизельного палива на перебіг окремо кожної з фаз такту згоряння та розширення.

Період затримки самозаймання триває від початку впорскування палива до початку його займання. Протягом цього періоду паливо під тиском впорскується в циліндр, випаровується, змішується з повітрям; відбувається утворення паливо-повітряної суміші та з'являються зони горіння. На початку цього періоду повітря в циліндрі стискається до 3,5...4,5 МПа та розігрівається до температури 600...700 °С.

Фізико-хімічними властивостями біодизельного палива зумовлюється збільшення діаметра крапель палива, яке впорскується до циліндра двигуна, збільшення далекобійності паливного струменя та зменшення кута розкриття паливного факела — це суттєво впливає на процес утворення суміші. За рахунок збільшення діаметра крапель палива зростає тривалість їхнього випаровування і подальшого згоряння. Також, зменшення розкриття паливного факела та збільшення далекобійності паливного струменя викликають зміни характеру сумішеутворення. Водночас зростає частка палива, що згоряє біля самої стінки камери згоряння. Паливо, яке потрапляє на стінки камери, швидше прогрівається, отже, його випаровування відбувається інтенсивніше. Також в циліндрах двигуна збільшуються зони відповідно зі збагаченою і збідненою паливними сумішами. У біодизельного палива значення цетанового числа більше ніж у дизельного палива, і це сприяє зменшенню тривалості періоду затримки самозаймання.

Протягом *періоду швидкого згоряння* об'єм палива, яке за період затримки самозаймання пройшло передполуменеу підготовку, згоряє з великою швидкістю. Тепловиділення та зростання тиску відбувається тим інтенсивніше, чим більшою є подача палива та дрібніше його розпилювання. За використання біодизельного палива період передполуменевої підготовки скорочується, також зменшується кількість палива, що пройшло цю підготовку. У разі застосування біодизельного палива погіршується дисперсність розпилювання, а отже, і час перебігу періоду швидкого згоряння палива зростає. Використання суміші дизельного і біодизельного палива, навіть з невеликим відсотком біодизельного, впливає на перебіг періоду швидкого згоряння палива досить позитивно. Займання біодизельного палива відбувається раніше та з меншою інтенсивністю, що викликає швидке проходження передполуменевої підготовки дизельного палива і збільшує інтенсивність горіння суміші.

Далі розглянемо *період повільного згоряння палива*, впорснутого в циліндр. На цьому етапі важливі якість розпилювання та кількість палива, яка впорскується після початку згоряння. Збільшується середній діаметр крапель впорснутого біодизельного палива, таким чином період повільного згоряння триває довше. За рахунок використання суміші дизельного і біодизельного палива з регульованим відсотковим вмістом біодизеля в ній можна зменшити тривалість періоду повільного згоряння палива, впорснутого у циліндр.

*Період розширення робочих газів.* Як видно з діаграми (див. рис. 1.), після точки  $\delta$  починається процес розширення, під час якого тиск в циліндрах двигуна знижується. Частина палива догорає в процесі розширення, час догорання свідчить про характеристики двигуна: чим він довший, тим гірші показники (зростає частка тепла, яка передається до систем охолодження і випуску відпрацьованих газів). У разі використання біопалива цей період збільшиться, але за рахунок регулювання в суміші палив відсоткового вмісту біодизельного палива можна змінювати тривалість перебігу періоду розширення газів.

Отже, з викладеного аналізу перебігу робочих процесів дизельного двигуна зрозуміло, що тривалість горіння палива є основним показником, що змінюється у разі переведення автомобільного двигуна на роботу з сумішшю дизельного та біодизельного палив.

Для об'єктивнішого аналізу впливу на перебіг робочих процесів у циліндрах двигуна фізико-хімічних властивостей суміші палив доцільно процеси згоряння та впорскування розглядати разом. Процес згоряння паливо-повітряної суміші залежить від того, як змінюються параметри процесу впорскування палива в камеру згоряння циліндрів двигуна, який переведено на роботу з сумішшю дизельного і біодизельного палива. За основні параметри оцінки впорскування палива в циліндри дизеля беруться: момент початку і тривалість впорскування; тонкість розпилювання і розподіл палива в камері згоряння; момент початку згоряння; циклова подача палива [4], [5]. Основні фізико-хімічні властивості палив, що безпосередньо впливають на процеси впорскування та

згоряння — це густина, в'язкість [6] та поверхневий натяг палива.

Відомим є той факт, що тривалість горіння залежить від періоду затримки самозаймання, тривалостей впорскування, випаровування і згоряння палива. Також це залежить від фізико-хімічних властивостей палива — енергії активації, густини, середнього діаметра крапель, а також від параметрів системи живлення дизеля: кута випередження впорскування, тиску впорскування, циклової подачі, коефіцієнта надлишку повітря, константи випаровування, площі поперечного перерізу та коефіцієнта витрати прохідних перерізів соплових отворів форсунок.

Для забезпечення ефективного перебігу робочих процесів в циліндрі двигуна дизеля найлегший вплив на двигун можна здійснити шляхом зміни на кут випередження впорскування. Інші впливи вимагають внесення конструктивних змін системи живлення. Для перевірки зазначеного проведено експериментальне дослідження впливу значення кута випередження впорскування на економічні та енергетичні показники дизельного генератора, обладнаного двигуном СМД-15Э, який працює на дизельному паливі та його суміші з дизельним. Дослідження проведено під час роботи дизеля з частотою обертання колінчастого валу  $n_0 = 1500$  об/хв, що відповідає технічним вимогам роботи генератора.

Результати експериментальних досліджень впливу зміни кута випередження впорскування на витрату суміші палив подано у таблиці. Для зручності аналізування результатів дослідження значення витрати суміші палив подані у вигляді циклової подачі суміші палив і кількості теплоти, яка виділяється під час згоряння, за якими в подальшому визначався оптимальний кут випередження впорскування.

**Результати експериментальних досліджень впливу зміни кута випередження впорскування на витрату суміші палив**

№	Вміст біодизельного палива в суміші палив $n_{БД}$ , %	Зміна кута випередження впорскування $\Delta\theta_{впр}^{\circ}$ до верхньої мертвої точки	Витрата суміші палив $G_{п}$ , г/30 с	Циклова подача суміші палив $q_{ц}$ , мг/цикл	Кількість теплоти, яка виділяється під час згорання циклової подачі суміші палив $Q$ , МДж	Зміна кількості теплоти, $\Delta Q$
1	0,0	0,0	69,0	46,0	1955	0 %
2	<b>25,0</b>	<b>0,0</b>	<b>73,0</b>	<b>48,7</b>	<b>2004</b>	<b>2,44 %</b>
3	25,0	-3,0	78,0	52,0	2141	8,69 %
4	50,0	0,0	84,0	56,0	2232	12,39 %
5	50,0	-3,0	83,0	55,3	2205	11,34 %
6	<b>50,0</b>	<b>-6,0</b>	<b>78,0</b>	<b>52,0</b>	<b>2072</b>	<b>5,66 %</b>
7	50,0	-9,0	83,0	55,3	2205	11,34 %
8	75,0	0,0	97,0	64,7	2491	21,53 %
9	75,0	-3,0	83,0	55,3	2132	8,29 %
10	75,0	-6,0	83,0	55,3	2132	8,29 %
11	<b>75,0</b>	<b>-9,0</b>	<b>82,0</b>	<b>54,7</b>	<b>2106</b>	<b>7,17 %</b>
12	75,0	-12,0	84,0	56,0	2157	9,38 %

Після оброблення результатів досліджень визначено необхідні значення зміни кута випередження впорскування в залежності від частоти обертання колінчастого валу дизеля та відсоткового складу суміші палив, які виділені в таблиці.

На рис. 2 показано залежність циклової подачі палива від кута випередження впорскування (у разі роботи дизеля з частотою обертання колінчастого валу 1500 об/хв, навантаженням на колінчастий вал двигуна 25 кВт) та відсоткового складу суміші палив.

На рис. 3 показані залежності кількості теплоти, яка виділяється під час згорання суміші палив за один цикл в циліндрі двигуна, від відсоткового складу суміші палив та кута випередження впорскування під час роботи дизеля з навантаженням на колінчастий вал двигуна 25 кВт та частотою обертання колінчастого валу 1500 об/хв. З цих залежностей видно, що зі збільшенням вмісту біодизеля в суміші палив до циліндра двигуна необхідно подати більшу кількість теплоти. Це зумовлено різними фізико-хімічними властивостями палив. Більша густина та в'язкість біодизельного палива збільшують витрати енергії на подачу палива паливним насосом низького тиску через фільтри до паливного насоса високого тиску і на створення високого тиску для розпилювання палива.

Температура випаровування та самозаймання біопалива вища ніж у дизельного палива, отже для проходження передпалуєвої підготовки суміші палив необхідно витратити більше енергії, проте для біодизельного палива передпалуєва підготовка триває менше та горіння починається раніше, тому збільшиться кількість палива, яке згорить до верхньої мертвої точки. Це призведе до зростання кількості палива, яке згорає даремно, не виконуючи корисної роботи, та створюючи при цьому протидію на поршень. Тому для визначення оптимального кута випередження впорскування палива проведено експериментальне дослідження впливу відсоткового складу суміші дизельного та біодизельного палива на зміну кута випередження впорскування та витрату палива. Слід зазначити, що для двигуна СМД-15Э базовий кут випередження впорскування палива дорівнював  $22^\circ$  до верхньої мертвої точки за використання суміші палив. В результаті експериментальних досліджень впливу зміни кута випередження впорскування на витрату суміші палив визначено необхідні значення зміни кута випередження впорскування в залежності від відсоткового складу суміші палив і частоти обертання колінчастого валу дизеля.

### Висновки

Процес впорскування палива має значний вплив на ефективність згорання паливно-повітряної суміші. Зміни фізико-хімічних властивостей суміші палив вимагають адаптації параметрів впорскування. Проведено експериментальні дослідження залежності циклової подачі палива та кількості підведеної теплоти в циліндр двигуна від складу суміші палива та кута випередження впорскування. Дослідження проводилось на дизельному генераторі з двигуном СМД-15Э за різних співвідношень дизельного та біодизельного палив в суміші. Встановлено, що для забезпечення ефективного перебігу робочих процесів в циліндрах двигуна під час роботи на суміші біодизельного та дизельного палива залежно від їхнього вмісту в суміші, потрібно змінювати циклову подачу та кут випередження впорскування палива, для двигуна СМД-15Э це значення може сягати  $9^\circ$  повороту колінчастого вала.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] I. Kupchuk, S. Burlaka, T. Yemchyk, D. Galushchak, and Yu. Prysiazniuk, "Research of autonomous generator indicators with the dynamically changing component of a two-fuel mixture," *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 147-162, 2022. [Electronic resource]. Available: <https://epj.min-pan.krakow.pl/pdf-150746-76732?filename=Research%20of%20autonomous.pdf>, <https://doi.org/10.33223/epj/150746>.
- [2] В. М. Мельник, Т. Й. Войцехівська, і М. М. Штих, «Дослідження впливу кута розпилення на експлуатаційні показники роботи двигуна при використанні біодизельного палива», *Нафтогазова енергетика*, № 1, с. 60-66, 2021.
- [3] А. І. Атамась, В. Ф. Шапко, і С. В. Шапко, «Підвищення екологічних показників дизельного автомобіля під час використання біодизельного палива», *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, № 3, с. 126-130, 2012.
- [4] А. П. Поляков, і О. О. Галушак, «Математична модель системи "Двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив"», *Наукові нотатки, Міжвузівський збірник*, Луцьк, вип. № 45, с. 438-443, 2014.
- [5] А. П. Поляков, О. О. Галушак, і Д. О. Галушак, «Методика визначення показників автомобіля з дизельним двигуном при використанні системи живлення з динамічним регулюванням відсоткового складу суміші палив», *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*, зб. наук. пр., серія: *Автомобіле- та тракторобудування*, № 10 (1119), с. 59-64, 2015.

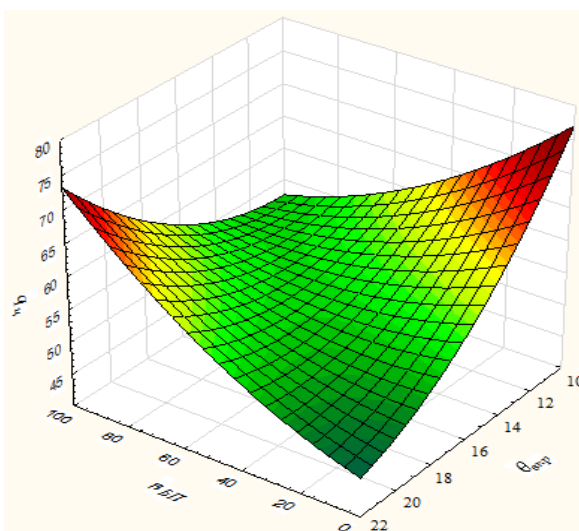


Рис. 2. Залежність циклової подачі палива від кута випередження впорскування та складу суміші палив

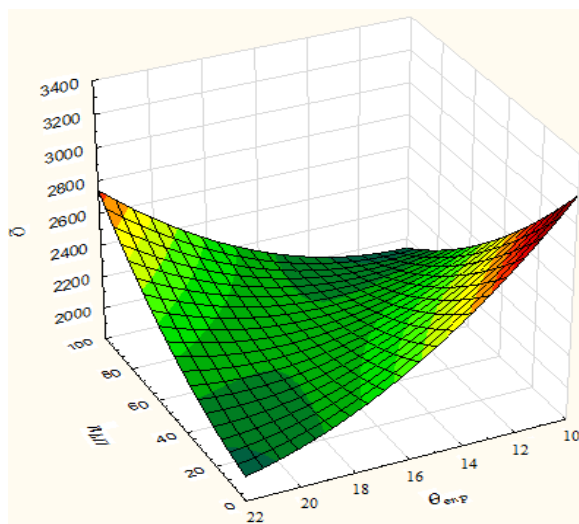


Рис. 3. Залежність кількості підведеної теплоти в циліндр двигуна від складу суміші палив та кута випередження впорскування

[6] F. M. R. Mesquita, F. X. Feitosa, F. R. do Carmo, R. S. de Santiago-Aguiar, and H. B. de Sant'Ana, "Viscosities and viscosity deviations of binary mixtures of biodiesel – petrodiesel (or n-hexadecane) at different temperatures," *Journal of Chemical Engineering*, Brazilian, September, vol. 29, no. 03, pp. 653-664, 2012. ISSN 0104-6632.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.10.2023

**Цимбал Сергій Володимирович** — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: tsymbal\_s\_v@ukr.net ;

**Галушчак Олександр Олександрович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: galushchak.gs@gmail.com ;

**Полив'ячук Андрій Павлович** — д-р техн. наук, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: ap3@ukr.net ;

**Галушчак Дмитро Олександрович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: galuschak.d@gmail.com ;

**Цимбал Ольга Василівна** — асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: unicorn@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**S. V. Tsymbal<sup>1</sup>**  
**O. O. Halushchak<sup>1</sup>**  
**A. P. Polyvianchuk<sup>1</sup>**  
**D. O. Halushchak<sup>1</sup>**  
**O. V. Tsymbal<sup>1</sup>**

## Improvement of the Environmental and Energy Efficiency of a Diesel Generator by Adjusting the Advance Angle of Fuel Injection

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*The article examines the impact of biodiesel fuel usage on the working processes of a diesel engine and its environmental and energy indicators. The fuel injection process has a significant impact on the combustion efficiency of the fuel-air mixture. Depending on the injection advance angle, the air pressure and temperature in the engine cylinders during fuel injection change. The self-ignition delay period of the fuel-air mixture is influenced by the properties of the fuel and the advance angle of its injection. The use of biodiesel makes it necessary to change the value of the cyclic fuel supply and to reduce the auto-ignition delay period of the fuel-air mixture. Changes in the physical and chemical properties of the fuel mixture require adaptation of the injection parameters.*

*The article analyzes the impact of biodiesel fuel and its mixture with diesel fuel on different phases of the diesel engine's operating cycle. For the analysis, such phases as injection, combustion and expansion are distinguished, including the period of auto-ignition delay, the period of rapid combustion, the period of slow combustion and the period of gas expansion. It is noted that the physicochemical properties of biodiesel fuel affect the processes of fuel injection, evaporation and combustion in the engine cylinders. The use of biodiesel fuel causes a change in the diameter of the injected fuel droplets, the range of the fuel jet, the intensity of combustion and other parameters. These changes, in turn, affect the duration of each phase of the combustion and expansion stroke. Regulating the content of biodiesel in the fuel mixture and changing the injection advance angle allows to influence the specified processes.*

*Experimental studies were performed on a diesel generator with an SMD-15E engine at different ratios of diesel and biodiesel fuels in the mixture. As a result of the experiments, the optimal values of the injection advance angle for different fuel mixtures were determined. After processing the research results, the necessary values of the change in the injection advance angle depending on the composition of the fuel mixture were determined in order to minimize energy costs for performing useful work.*

**Keywords:** biodiesel, diesel engine, fuel mixture, injection advance angle.

**Tsymbal Serhii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Automobiles and Transport Management, e-mail: tsymbal\_s\_v@ukr.net ;

**Halushchak Oleksandr O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automobiles and Transport Management, e-mail: galushchak.gs@gmail.com ;

**Polyvianchuk Andrii P.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Automobiles and Transport Management, e-mail: ap3@ukr.net ;

**Halushchak Dmytro O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automobiles and Transport Management, e-mail: galuschak.d@gmail.com ;

**Tsymbal Olha V.** — Assistant of the Chair of Automobiles and Transport Management, e-mail: unicorn@ukr.net