

## Відновлювальне дизельне паливо та синтетичне паливо як альтернатива для дизельного палива

*Найбільш розповсюдженим дизельним альтернативним паливом є дизельне біопаливо (біодизель). Велика в'язкість біодизельного палива та збільшення викидів оксидів азоту, порівняно з дизельним паливом, обмежують використання його в двигунах автомобіля. До багатообіцяючої перспективи належать відновлювальне дизельне та синтетичне паливо. Був зроблений детальний аналіз властивостей, параметрів розпилювання та викидів для різних видів альтернативних палив для дизельних двигунів, виходячи з експериментальних даних. Результати моделювання параметрів розпилювання альтернативних палив показують, що формули, які були запропоновані для біодизельного палива, можна використовувати для відновлювального дизельного та синтетичного палив. Виходячи з характеристик розпилювання, найближчим паливом до дизельного можна вважати відновлювальне дизельне паливо.*

**Ключові слова:** автомобільний транспорт; дизельне біопаливо; відновлювальне дизельне паливо HVO; синтетичне паливо BTL.

**Постановка проблеми.** Використання нафтових палив викликає потрійний негативний ефект: локальне – забруднення повітря; регіональне – кислотні дощі; глобальне – парниковий ефект [1]. Проблеми з використанням нафтових палив часто є однією з причин локальних та світових військових дій. Враховуючи вище сказане, а також завдяки обмеженим світовим джерелам нафти, інтерес до альтернативних та відновлювальних палив зростає. Збільшення випуску електромобілів не може повністю замінити автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння. До того ж недоліки електромобілів, які пов'язані в першу чергу з недовговічністю і великою вартістю акумуляторів, не дозволяють перейти на цей вид транспорту найближчим часом.

Найбільш розповсюдженим дизельним альтернативним паливом є дизельне біопаливо (біодизель), що являє собою, як правило, метиловий або етиловий ефір рослинної олії [2–3]. В Європі є станції, де за бажанням можна заправити біодизелем автомобіль [3], в той самий час багато енергетичних компаній (наприклад, Брітіш Петроліум) обов'язково додають у дизельне паливо певний відсоток біодизельного палива. Якщо палива першого покоління у Європі виготовляють з ріпакової олії та соєвої олії в США, то на даний час дослідження ведуться над паливами другого покоління, які мають виготовлятися з речовин, що непридатні для їжі або ж відходів виробництва. Це можуть бути, наприклад, відходи від виробництва безнаркотичної коноплі [4] або водорості [5].

Детальний огляд біодизельних палив першого покоління можна знайти в [2]; в [6] описані властивості біодизельних палив як першого, так і другого покоління, що прогноуються з молекулярного складу палива. В [7] аналізується згоряння та викиди біодизельних палив, включаючи конопляний біодизель. У [8–10] приведені дослідження параметрів згоряння та викидів при використанні мікрводоростей як палива.

Інші палива, що обіцяють бути перспективними – диметиловий ефір (DME) та гідрована рослинна олія (HVO) або гідрована використана рослинна олія (HWCO). DME являє собою газ за кімнатної температури, який потребує нових сховищ і систем доставки. Палива HVO та HWO не містять сірки та ароматичних складових частин. Цетанове число таких палив вище, ніж дизельного палива, в той самий час змазуваність нижча [9].

До багатообіцяючої альтернативи належать також ультра чисте високо цетанове паливо, що одержують за допомогою процесу Fisher-Tropsh (FT). Це паливо часом називають синтетичним дизельним паливом або FT-паливом. FT-паливо може виготовлятися з натурального газу (кінцевий продукт – GTL), з вугілля (CTL) чи біомаси (BTL). FT-паливо також може бути змішане в довільній пропорції з дизельним паливом [1, 9]. GTL вже виробляється комерційно і продається у деяких Європейських країнах [1]. Властивості HVO подібні до GTL або BTL [9,10]. Виробництво, властивості, характеристики розпилювання та викиди у випадку використання біодизельного палива вже добре досліджені за останні 10 років. Відновлювальні та синтетичні види палива, що описані вище, ще потребують досліджень.

**Метою роботи** є дослідження властивостей, параметрів розпилювання, витрати палива та викидів у випадку використання нових видів палив.

### 1. Виробництво альтернативних палив

Паливо HVO, або як його ще часто називають «відновлювальне дизельне паливо» (renewable diesel) виробляється, використовуючи процес, що називається «conventional hydrotreated catalysts» [11]. Під час піролізу часто використовують ціоліти як каталізатори, а гідрування (hydrotrating) виконується з каталізаторами NiMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> чи CoMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В той час коли піроліз потребує нормального тиску та підвищених температур, то гідрування потребує підвищених температур та тиску [11].

Виробництво синтетичного палива VTL починається з подрібнювання та сушки біомаси, яка потім формується в пелети. Пелети далі перетворюють в «тліючий газ» (smoldering gas) та тверду фракцію під час низькотемпературного процесу і на наступному етапі відбувається трансформування в синтетичний газ. Після очищення газ перетворюють в рідину за допомогою FT-реакції. Під час реакції використовується кобальт або залізо як каталізатори, в результаті одержують в основному алифатичні вуглеводні (C<sub>4</sub> – C<sub>40</sub>). Рідина, що утворюється, являє собою рідину типу парафінової і може бути далі гідрогенізована для збільшення стабільності і для більшої придатності у ДВЗ. Хоча є багато публікацій про FT-паливо, але інформації про VTL не багато [1]. В Україні палива, які одержані за допомогою FT-реакції, часто ще називають синтетичними паливами.

### 2. Властивості палив, альтернативних до дизельного палива

В таблиці 1 показані властивості дизельного палива (7 % RME), HSCO, HVO та суміші 70 % HVO та 30 % дизельного палива.

Таблиця 1

Властивості палив

Властивість	Одиниці вимірювання	Дизельне (7 % RME) [9]	Дизельне EN 590 [10]	HSCO [9]	HVO [10]	HVO 70% EN 590 (30%) [10]
Густина, 60 °С	кг/м <sup>3</sup>	832.4	–	756	–	–
Густина, 15 °С	кг/м <sup>3</sup>	–	843.0	–	779.7	824.0
Кінематична в'язкість, 40 °С	мм <sup>2</sup> /с	3.236	3.208	3.691	3.087	3.165
Температура займання	°С	59	68	84	99	74
Температура помутніння (Cloud point)	°С	–5	–5	7	–20.5	–6
CFPP	°С	–5	–	19	–	–
Теплота згорання	МДж/кг	43	45.99	44	47.27	46.35
Ефективна теплота згорання	МДж/кг	–	43.13	–	44.04	43.38
	МДж/л	–	36.35	–	34.34	35.75
Цетанове число		56.5	54.6	> 80	> 70	> 65
Цетанове число (IQT <sup>TM</sup> )		–	57	–	95	71.9
Температура 90 % дистиляції	°С	344	343	310.6	298	332
Кінцева точка кипіння	°С	367	363	347.5	313	358

У [12–14] були досліджені біодизельні та FT-палива. В таблиці 2 показано порівняння властивостей альтернативних палив RME та GTL з дизельним паливом ULSD. GTL має більшу теплоту згорання, ніж дизельне та біодизельне паливо, та набагато більше цетанове число. В [12] проведено дослідження над альтернативними паливами, властивості яких показані в таблиці 3, порівняно дизельним паливом.

Таблиця 2

Порівняння властивостей дизельного палива ULSD, RME та GTL

Властивості палива	Одиниці вимірювання	ULSD [14]	RME [14]	GTL [14]
Густина, 15 °С	кг/м <sup>3</sup>	827.1	883.7	786.4
Кінематична в'язкість, 40 °С	мм <sup>2</sup> /с	2.467	4.478	3.497
Нижча теплота згорання	МДж/кг	42.7	37.4	43.9
Цетанове число		53.9	54.7	80
50 % дистиляції	°С	264	335	295.2
90 % дистиляції	°С	329	342	342.1
Сірка	мг/кг	46	5	<10
Ароматичні вуглеводи	% ваги	24.4	~0	0.3
О	% ваги	~0	10.8	~0
С	% ваги	86.5	77.2	85
Н	% ваги	13.5	12.0	15
Н/С *відношення		1.88	1.85	2.10

\*Н/С – молярне відношення

Таблиця 3

Властивості альтернативних дизельних палив, порівняно з дизельним паливом

Паливо	Густина, 40 °С, (г/мл)	Кінематична в'язкість, 40°С, (мм <sup>2</sup> /с)	Поверхневий натяг, (мН/м)
Дизельне паливо (D)	0.83	2.65	30.3
Біодизель (B100)	0.87	4.60	34.7
20% біодизеля +D (B20)	0.84	3.04	27.7
Відновлювальне дизельне паливо (R)	0.76	2.48	30.3
Авіаційне паливо «Jet A» (J)	0.79	1.15	28.7

Біодизельне паливо (B100), властивості якого зазначено в таблиці 3, було виготовлено з використаної олії. Відновлювальне паливо (R), що складалося з суміші n-алканів та ізоалканів, було виготовлене з канолової олії. Відновлювальне дизельне паливо не містить кисню на відміну від біодизельного палива і має найменшу густину з розглянутих палив, що показні в таблиці 3. Біодизель має максимальні значення густини, в'язкості та поверхневого натягу. Відновлювальне дизельне паливо має такий же самий поверхневий натяг, як і дизельне паливо. Паливо (J), як правило, використовується для наземного транспорту в аеропортах, для того щоб зменшити кількість різних палив [12].

### 3. Розпилювання палива

У роботі [9] показані експериментальні дослідження на двигуні Toyota IND (дизельний двигун Euro 5) з використанням системи безпосереднього впорскування Common Rail. Двигун працював чотири години при швидкості 2500 об./хв. і навантаженні 100 Н×м. У [12] також використовувалася система Common rail та форсунка з одним отвором для аналізу розпилювання альтернативних палив. Тиск впорскування був 300, 500, 800, 1000 бар за атмосферного тиску в двигуні. Час впорскування був 1.5 мс. На рисунку 1 показано струмінь розпилювання і параметри впорскування, що досліджувалися.

**Діаметри крапель за Заутером при розпилюванні палива.** Експериментальні дослідження [12] показують, що краплі біодизельного палива мають більші середні діаметри крапель за Заутером (SMD), ніж краплі дизельного палива за різних тисків впорскування (подовженість впорскування 1.5 мс). Автори [12] вважають, що причиною зміни діаметрів крапель є більший поверхневий натяг і в'язкість біодизельного палива. Більша в'язкість веде до нижчої швидкості потоку, що приводить до більших крапель. Менший поверхневий натяг допомагає струменю, що розпилюється, легше розділятися на більш дрібні краплі. Причому, в'язкість робить більший вклад у розміри крапель, ніж поверхневий натяг [12].

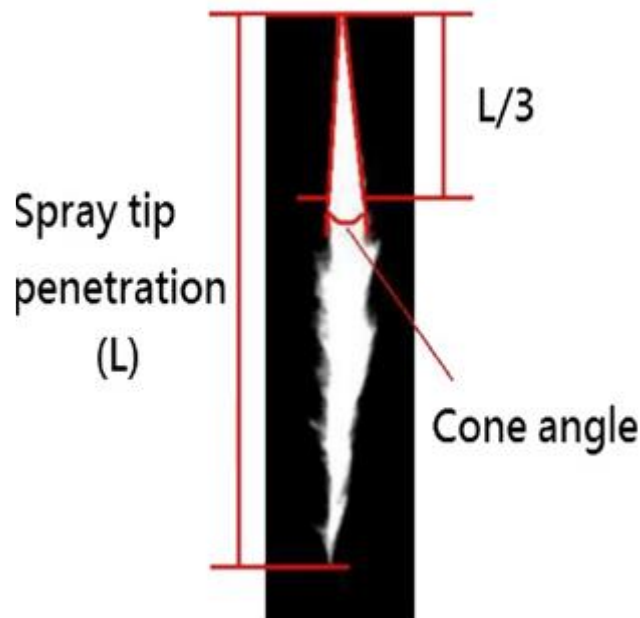


Рис. 1. Зображення паливного струменя [12], де показані довжина конуса розпилювання «spray tip penetration» та кут розпилювання «cone angle»

У дослідженнях [12] найменші за розміром краплі були знайдені вздовж осі конуса розпилювання, причому розміри крапель були більшими на периферії розпилювання. Причина цього, що тиск розпилювання менший на периферії і дорівнює оточуючому тиску. На радіальній відстані біля 1 см (що вже за зоною периферії), розпилювання стає нещільним і розрідженим, і розмір крапель зменшується знову. Найменші середні діаметри крапель спостерігалися для палива  $J$ , трохи менші для палива  $R$  при малих тисках впорскування. Діаметри крапель за Заутером для палива  $R$  були майже такими, як і для палива  $J$  при збільшенні тиску впорскування.

**Розподілення крапель.** Хоча паливо  $R$  мало такий самий поверхневий натяг, як і дизельне паливо, але розподілення крапель цього палива було близьке до біодизельного палива при тиску 300 бар, а також близьке до крапель палива  $J$  при вищих тисках впорскування [12]. Це означає, що швидше всього поверхневий натяг палива мало впливає на процеси розподілення крапель.

**Довжина конуса розпилювання.** Довжина конуса та кут розпилювання в дослідженні [12] були усереднені з 5 експериментів кожного зображення як для дизельного, так і біодизельного палива. Довжина конуса розпилювання палив, як правило, збільшується зі збільшенням тиску впорскування. Так, наприклад, для дизельного палива, довжина конуса розпилювання була 10 см при тиску впорскування 300 бар; та 14 см при тиску впорскування 100 бар. Найменшу довжину конуса розпилювання показувало в основному паливо  $R$ , а також  $J$ , через їх меншу густину, як вважають автори [12]. Найменше значення конуса розпилювання для палива  $R$ , порівняно з  $J$ , пов'язано з тим фактом, що паливо  $J$  має дуже низьку в'язкість ( $1,15 \text{ мм}^2/\text{с}$ ). Ця екстремально низька в'язкість знижує тертя між паливом та поверхнею отвору форсунки і викликає більшу швидкість виходу з отвору форсунки.

У [12] було розраховано об'єми розпилювання як експоненціальні криві під низьким тиском (300 бар), використовуючи таку залежність:

$$V = (\pi/3)S^3 \left[ \tan^2(\theta/2) \right] \frac{1 + 2 \tan(\theta/2)}{|1 + \tan(\theta/2)|^3},$$

де  $S$  – довжина конуса розпилювання, та  $\theta$  – кут конуса розпилювання.

При високому тиску впорскування паливо поставляється швидше, ніж при низькому тиску і досягає рівноважного стану швидше. Більший об'єм розпилювального струменя спостерігається за більшого тиску впорскування для дизельного палива [12]. Наприклад, об'єм розпилювання виріс з  $9 \text{ см}^3$  до  $19 \text{ см}^3$  за час 1,5 мс після початку роботи тригера, коли тиск впорскування збільшувався від 300 до 1000 бар.

Біодизельне паливо показувало більший об'єм розпилювання при всіх тисках розпилювання. В [12] зроблено висновок, що така тенденція в основному визначається довжиною конуса розпилювання (spray penetration length), оскільки варіації у зміні кута були незначні для дизельного палива у більш пізні часи розпилювання. Найменший об'єм палива одержався для відновлювального палива  $R$ , що має найменшу густину із досліджуваних палив. Найбільший об'єм при розпилюванні показало біодизельне паливо, яке мало найбільшу густину. Цікаво, що паливо B20 показало менший об'єм при розпилюванні, ніж дизельне паливо. Тут видається дивним дуже низький поверхневий натяг B20. Як правило, очікується, що суміш займе проміжкове значення між своїми компонентами, але ця тенденція не спостерігалась у випадку B20. На нашу думку, на довжину конуса розпилювання та на об'єм впорскнутого палива B20 вплинув поверхневий натяг палива.

#### 4. Викиди при використанні альтернативних дизельних палив.

Використання біодизеля як палива для дизельних двигунів, як правило, приводить до більших викидів оксидів азоту та зменшення викидів сажі. Зменшення викидів сажі при використанні біодизельного палива пов'язано з присутністю кисню у складі молекули біодизельного палива, а також, що більш важливо, відсутністю циклічних вуглеводнів у складі біодизельного палива. Детально дослідження викидів при роботі двигуна на біодизельному паливі можна знайти в [15–16]. Формування  $\text{NO}_x$  залежить також від вмісту кисню у паливі, від температури в циліндрі двигуна, затримки займання. Довший ланцюжок і більша кількість ненасичених жирних кислот в біодизелі корелюють зі збільшенням  $\text{NO}_x$  викидів [9]. Викиди для соєвого біодизеля та біодизеля з мікрводоростей проаналізовані в [10]. Експериментальні дані, що одержані дослідниками [10], приведені в таблиці 4.

#### 5. Аналіз витрати палива для альтернативних палив.

Відомо, що витрата палива автомобіля, що працює на біодизельному паливі більша, ніж автомобіля, що працює на дизельному паливі. Зрозуміло, що властивості альтернативних палив залежать від молекулярного складу палива. Як відомо, біодизельне паливо складається з суміші метилових ефірів жирних кислот, причому кожна молекула палива вносить різний вклад у витрату палива. Припустимо двигун працює на біодизельному паливі, що складається з молекул одного типу. З точки зору індикаторної теплової (indicated thermal) ефективності  $\eta$  (%), термічна ефективність складової C18:1M буде 33,19 % та дизельного палива – 31,7 %. Тоді, термічна ефективність складової C18:1 M більша, ніж дизельного палива на 4,7 %.

Експериментально одержані викиди для В100 соєвого біодизельного палива при кількості обертів двигуна 2200 об./хв. [10]

Кількість Обертів (об./хв.)	Момент (Нм)	NO <sub>x</sub> (ppm)	CO (ppm)	HC (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	A/F	O <sub>2</sub> (% об'єму)	Lambda	*M (мг)
2200	2.5	75	400	18	26400	93,7	17,5	6,52	8,027
2200	5	96	400	19	36600	70,1	16,2	4,85	14,335
2200	7.5	113	700	19	49800	51,2	14,7	3,63	17,059
2200	10	128	2600	21	67800	34,2	12,1	2,45	24,335

\*M – маса палива, що впроркнута за цикл

Паливо HVO мало менші викиди CO<sub>2</sub> (-2 %) та більші викиди окислів азоту (+5 %), порівняно з дизельним паливом

При використанні палива HVO, масова витрата палива знижується в порівнянні з дизельним паливом, тому що маса палива, що базується на ефективному тепловому значенні палива, є більшою. Об'ємна витрата палива збільшується з використанням HVO, тому що це паливо має нижче об'ємне теплове значення палива [10].

Використання відновлювального дизельного палива знижує питому витрату палива та викиди окислів азоту, порівняно з дизельним паливом, на всіх навантаженнях та швидкостях, як показано в [10]. Зниження питомої витрати палива відбувається за рахунок більшого значення «ефективного теплового значення» для HVO. Можливе збільшення потужності двигуна може бути пов'язане з більшим цетановим числом HVO, та з меншою затримкою займання.

#### 6. Моделювання процесу розпилювання.

У цій роботі було розраховано значення середніх діаметрів крапель, а також довжини конуса розпилювання для широкого діапазону альтернативних дизельних палив, які розглянуті вище.

**6.1. Максимальна довжина конуса розпилювання.** У [15] (Sandia National Laboratory) була досліджена максимальна довжина конуса розпилювання  $S_{liqmax}$  для різних альтернативних палив і були представлені деякі цікаві інженерні залежності. Було показано, що  $S_{liqmax}$  можна знаходити, використовуючи залежність [15]:

$$S_{liqmax} / d_0 = kA^\alpha B^\beta, \quad (1)$$

де  $A$ ,  $B$  – параметри;  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коефіцієнти;  $d_0$  – діаметр форсунки.

Для однокомпонентних палив значення параметрів  $A$  та  $B$  можна знайти, виходячи з таких залежностей [15]:

$$A = \frac{\rho_f}{\rho_a}, \quad (2)$$

$$B = \frac{C_{p,liq}(T_b - T_f) + L}{C_{p,air}(T_{air} - T_b)}, \quad (3)$$

де  $\rho_f$  – густина палива;

$\rho_a$  – густина газу в циліндрі;  $L$  – скрита теплота випаровування;

$T_f$  – початкова температура;  $T_b$  – температура кипіння палива;

$C_{p,liq}$  – питома теплоємність палива при постійному тиску;

$T_{air}$  – температура газів у циліндрі ( $T_{air} = T_a$ ).

В таблиці 5 показані значення параметрів палив за нормальних умов, що зазначені в роботі [15]. Густина та питома теплоємність були оцінені за 298 К. Прихована теплота випаровування і температура кипіння (90 %) були оцінені за тиску 101 КПа.

Значення параметрів палив за атмосферних умов (101 КПа та 298 К)

Параметр	Одиниця вимірювання	Метилловий спирт (M100)	Соєве біодизельне паливо (B100)	Дизельне паливо (DF2)	Фішер-Тропш* дизель (FTD)	Бензин, без вмісту свинцю (HSG)
Густина	кг/м <sup>3</sup>	790	892	845	782	737
Питома теплоємність	Дж/кг/К	2824	3122	3197	3197	2235
Скрита теплота випаровування	кДж/кг	1100	243	224	224	335
$T_{90}$	К	338	630	576	611	421
С/Н/О		38/13/50	78/12/10	86/14/0	85/15/0	87/13/0

\*Фішер Тропш (Fischer-Tropsch)

Як бачимо з таблиці 4, парафінове паливо відрізняється від дизельного палива температурою дистиляції. На рисунку 2 показано максимальну довжину конуса розпилювання для різних альтернативних палив, що підрахована, виходячи з формул (1)–(3). Зауважимо, що ці формули одержані тільки для певного розміру отвору форсунки. Отже, даний підхід потребує коректування щодо зміни отвору форсунки. Максимально наближеними до дизельного палива виявилися палива HVO та HWO, тому що ці парафінові палива мають таку саму приховану теплоту випаровування та теплоємність, як і дизельні палива, але вони мають нижчу густину і нижчу температуру дистиляції.

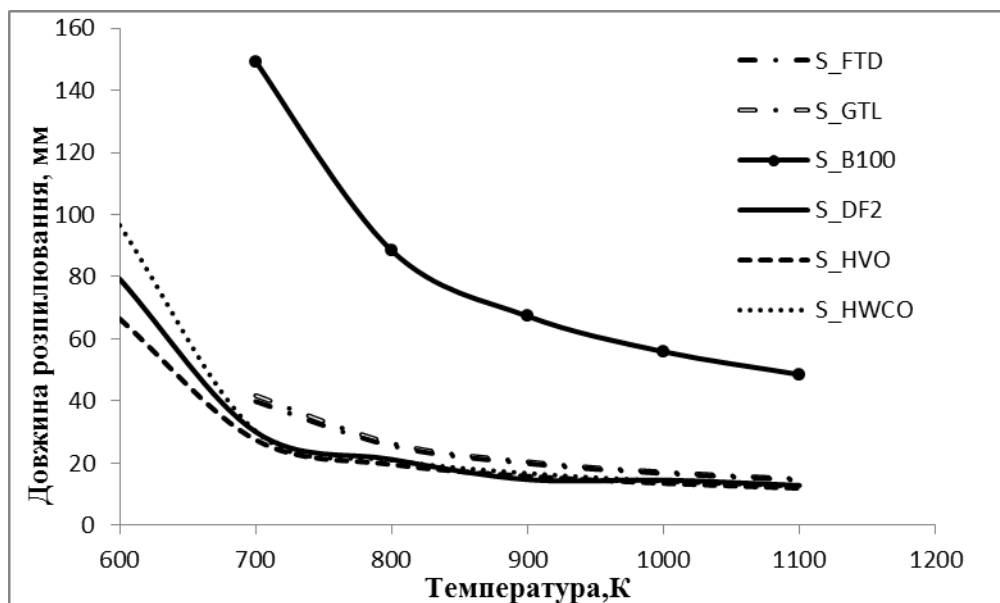


Рис. 2. Максимальна довжина конуса розпилювання для альтернативних палив HVO, HWCO, FTD, GTL та B100, порівняно з дизельним паливом DF2

Виходячи з досліджень [12], найменшу довжину конуса розпилювання мало паливо R, а найбільшу довжину конуса розпилювання мало паливо B100. Значення довжини конуса розпилювання згідно з експериментальними даними [12] можна записати як послідовність (від меншого до більшого): R, J, B20, D, B100. Вірогідніше, в значенні довжини конуса розпилювання найбільшу роль відіграє густина палива, що має майже таку саму послідовність, як і довжина конуса розпилювання (R, J, D, B20, B100) за виключенням B20. Швидше за все, більші розміри крапель при розпилюванні палива B20, порівняно з B100, пов'язані з найнижчим значенням поверхневого натягу, порівняно з іншими розглянутими паливами.

### 6.2. Середній діаметр крапель.

Середній діаметр крапель при розпилюванні (діаметр Заутера або SMD) можна порахувати за формулою, що зазначена в роботі [2]:

$$SMD = Ad_0^{xd} \Delta P^{xp} \rho_g^{xro} LP^{xl}, [m] \quad (4)$$

де  $d_0$  – діаметр вихідного отвору форсунки [м],  $\rho_g$  – густина газу [кг/м<sup>3</sup>],

$\Delta P = P_f - P_g$ ,  $P_f$  – тиск впорскування палива,  $P_g$  – тиск газу в циліндрі двигуна [Па].

$LP = \mu_f^2 / (\sigma \rho_f)$  – параметр довжини [м],  $\rho_f$  – густина палива [кг/м<sup>3</sup>],  $\sigma$  – поверхневий натяг палива [Н/м],  $\mu_f$  – динамічна в'язкість палива [Па·с].

Формула (4) була перевірена для дизельного палива та метилового ефіру ріпакової олії (біодизельного палива) при значенні коефіцієнтів  $A = 23$ ;  $xd = 0,35$ ;  $xp = -0,54$ ;  $xro = 0,06$ ;  $xl = 0,1$ .

В'язкість палива призводить до зміни параметрів розпилювання, викликаючи збільшення довжини струменя, зменшення кута розпилювання і збільшення діаметра крапель.

На рисунку 3 показані середні діаметри крапель за Заутером, що підраховані за формулою (4) для різних альтернативних палив, властивості яких показані в таблиці 3, порівняно з експериментальними даними [12].

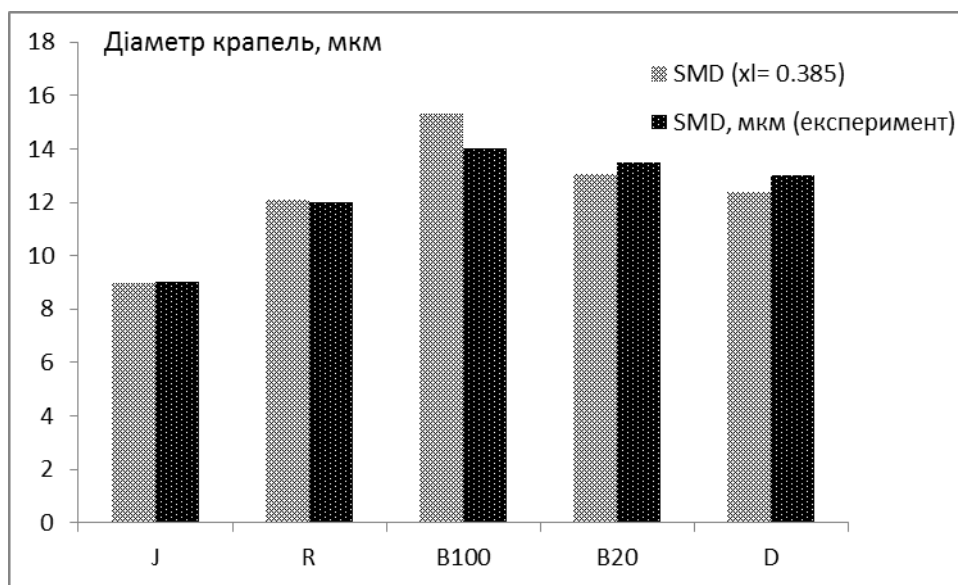


Рис. 3. Середній діаметр крапель при розпилюванні для альтернативних палив J, R, B20, B100, порівняно з дизельним паливом D

З рисунка 2 видно, що середні діаметри крапель за Заутером (SMD), які одержані за формулою (4), показують гарне співпадання з експериментальними даними [12]. Найменші діаметри крапель показують палива R, J, а найбільші – біодизельне паливо. Домінантну роль тут відіграє в'язкість та меншою мірою густина палива. Роль поверхневого натягу в розмірі крапель ще до кінця не в'яснена. Виходячи як з експериментальних досліджень, так і з моделювання середнього діаметру крапель, найближчим паливом до дизельного палива можна вважати відновлювальне паливо (паливо R на рис. 3).

#### Висновки:

1. Розглянуто альтернативні палива для дизельних двигунів: відновлювальне дизельне паливо (HVO) та синтетичне паливо (BTL), порівняно з дизельним та біодизельним паливом.
2. Виконано аналіз властивостей, параметрів розпилювання та викидів різних видів альтернативних палив для дизельних двигунів.
3. Моделювання параметрів розпилювання альтернативних палив показує, що формули, які були запропоновані для біодизельного палива, можна застосовувати для інших альтернативних палив.
4. Виходячи з характеристик розпилювання, найближчим паливом до дизельного палива можна вважати відновлювальне паливо.

#### Список використаної літератури:

1. Gill S.S. Combustion characteristics and emissions of Fischer-Tropsch diesel fuels in IC engines» / S.S Gill, A.Tsolakis, K.D. Dearn, J.Rodríguez-Fernández // Progress in Energy and Combustion Science. – 2011. – No. 37. – P. 503–523.
2. Колодницька П.В. Розпилювання дизельного палива та біопалива у двигунах внутрішнього згоряння : монографія / П.В. Колодницька. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 210 с.

3. Кравченко А.П. Энергосберегающие технологии на основе добавок растительных масел в топливо автомобиля с дизельным двигателем / А.П. Кравченко, А.В. Ильченко, Р.В. Колодницкая // Политранспортные системы. – Новосибирск : СГУПС, 2009. – С. 470 – 475.
4. Колодницкая Р.В. Моделирование розпилювання біодизельного палива на основі конопляної олії / Р.В. Колодницкая // Вісник СНУ ім. Володимира Дала. – 2010. – № 6 (148). – С. 41–46.
5. Колодницкая Р.В. Моделирование физических свойств та параметров розпилювання дизельных биопалив на основе микроводоростей / Р.В. Колодницкая, Р.В. Васильев // Вісник ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ. – 2012. – № 3 (62). – С. 80 – 87.
6. Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation / S.S. Sazhin, M.Al Qubeissi, R.Kolodnytska and other // Fuel. – 2014. – No.115. – P. 559–572.
7. Колодницкая Р.В. Анализ влияния углеводородного состава биодизельного топлива на показатели рабочего процесса дизельных двигателей / Р.В. Колодницкая, Г.А. Вершина Г.А., А.Ю.Пилатов // Вісті автомобільного-дорожнього інституту. – 2011. – № 1 (121). – С. 118 – 128.
8. Колодницкая Р.В. Моделирование технико-экономических показателей рабочего процесса биодизеля на основе растительных масел морских водорослей / Р.В. Колодницкая, А.Ю. Пилатов // Вестник СевГУ. Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь : СевНТУ, – 2012. – Вып. 134. – С.191–194.
9. Combustion and Emissions of a Common-Rail Diesel Engine Fueled with HWCO / M.Kousoulidou, A.Dimaratos, A.Karvountzis-Kontakiotis, Z.Samaras // J.Energy Eng. Innovative Technologies on Combustion of Biofuels in Engines. – 2014. – No. 140.
10. Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel:Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine / H.Aatola, M.Lanni, T.Sarjovaara, S.Mikkonen // SAE World Congress. – 2008. – No. 1.
11. Knothe G. Biodiesel renewable diesel: a comparison / G.Knothe // Progr Energy Combust Sci. – 2010. – No. 36. – P. 364–373.
12. Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system / P.C. Chen, W.C. Wang, W.L. Roberts, T.Fang // Fuel. – 2013. – No. 103. – P. 850 – 861.
13. Fuel Spray Combustion of Waste Cooking Oil and Palm Oil Biodiesel: Direct Photography and Detailed Chemical Kinetics / O.Kuti, K.Nishida, M.Sarathy, J.Zhu // SAE Technical Paper. – 2013. – No 1.
14. Characteristics of LPG-diesel dual fuelled engine operated with rapeseed methyl ester and gas-to-liquid diesel fuels / H.S. Tira, J.M. Herreros, A.Tsolakis, M.L. Wyszynski // Energy. – No. 47. – P. 620 – 629.
15. Higgins B.S. Measurement of fuel effects on liquid-phase penetration in DI sprays / B.S. Higgins, C.J. Mueller, D.L. Siebers // SAE International. – 1999. – No. 1. – P. 135–148.
16. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends / E.G. Giakoumis, C.D. Rakopoulos, A.M. Dimaratos, D.C. Rakopoulos // Progress in Energy and Combustion Science. – 2012. – Vol. 38. – P. 691–715.

#### References:

1. Gill, S.S., Tsolakis, A., Dearn, K.D. and Rodríguez-Fernández, J. (2011), «Combustion characteristics and emissions of Fischer-Tropsch diesel fuels in IC engines», *Progress in Energy and Combustion Science*, No. 37, pp. 503–523.
2. Kolodnyts'ka, R.V. (2017), *Rozpylyvannya dyzel'nogo palyva ta biopalyva u dygunah vnutrishnjogo zgoryannya: monograf*, ZDTU, Zhytomyr, 210 p.
3. Kravchenko, A.P., Ilchenko, A.V. and Kolodnyts'ka, R.V. (2009), «Energoberegayushchiye tekhnologii na osnove dobavok rastitel'nykh masel v toplivo avtomobilya s dizel'nyim dvigatelem», *Polittransportnyye sistemy*, SGUPS, Novosibirsk, pp. 470–475.
4. Kolodnyts'ka, R.V. (2010), «Modelyuvannya rozpylyvannya biodyzel'noho palyva na osnovi konoplyanoyi olii», *Visnyk SNU im. Volodymyra Dalya*, No. 6 (148), pp. 41–46.
5. Kolodnyts'ka, R.V. and Vasyly'ev, R.V. (2012), «Modelyuvannya fizychnykh vlastyvostry ta parametriv rozpylyvannya dyzel'nykh biopalyv na osnovi mikrovodorostey», *Visnyk ZhDTU*, No. 3 (62), pp. 80–87.
6. Sazhin, S.S., Al Qubeissi, M., Kolodnytska, R. and other (2014), «Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation», *Fuel*, No.115, pp. 559–572.
7. Kolodnyts'ka, R.V., Vershina, G.A. and Pilatov, A.YU (2011), «Analiz vliyaniya uglevodorodnogo sostava biodizel'nogo topliva na pokazateli rabocheho protsessha dizel'nykh dvigateley», *Visti avtomobil'nogo-dorozhn'ogo institutu*, No. 1 (121), pp. 118–128.
8. Kolodnyts'ka, R.V. and Pilatov, A.YU. (2012), «Modelirovaniye tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley rabocheho protsessha biodizelya na osnove rastitel'nykh masel morskikh vodorosley», *Vestnik SevGTU, Mashinopribostroyeniye i transport*, Izd-vo SevNTU, Sevastopol, Vol. 134, pp.191–194.
9. Kousoulidou, M., Dimaratos, A., Karvountzis-Kontakiotis, A., and Samaras, Z. (2014), «Combustion and Emissions of a Common-Rail Diesel Engine Fueled with HWCO», *J. Energy Eng. Innovative Technologies on Combustion of Biofuels in Engines*, No.140.
10. Aatola, H., Lanni, M., Sarjovaara, T. and Mikkonen, S. (2008), «Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel:Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine», *SAE World Congress*, No. 1.
11. Knothe, G. (2010), «Biodiesel and renewable diesel: a comparison», *Progr. Energy Combust Sci.*, No. 36, pp. 364–373.
12. Chen, P.C., Wang, W.C., Roberts, W.L. and Fang, T. (2013), «Spray and atomization of diesel fuel and its alternatives from a single-hole injector using a common rail fuel injection system», *Fuel*, No. 103, pp. 850–861.



13. Kuti, O., Nishida, K., Sarathy, M. and Zhu, J. (2013), «Fuel Spray Combustion of Waste Cooking Oil and Palm Oil Biodiesel: Direct Photography and Detailed Chemical Kinetics», *SAE Technical Paper*, No 1.
14. Tira, H.S., Herreros, J.M., Tsolakis, A. and Wyszynski, M.L. (2012), «Characteristics of LPG-diesel dual fuelled engine operated with rapeseed methyl ester and gas-to-liquid diesel fuels», *Energy*, No. 47, pp. 620–629.
15. Higgins, B.S., Mueller, C.J., Siebers, D.L. (1999), «Measurement of fuel effects on liquid-phase penetration in DI sprays», *SAE International*, No. 1, pp.135–148.
16. Giakoumis, E.G., Constantine, D., Athanasios, M. and other (2012), «Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends», *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 38, pp. 691–715.

**Колодницька** Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

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](mailto:ruslanakolod2017@gmail.com)

**Кравченко** Олександр Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси: підвищення ефективності експлуатації автомобільного транспорту.

E-mail: [avtoap@ukr.net](mailto:avtoap@ukr.net).

Стаття надійшла до редакції 02.04.2019.