

УДК 629.5.03-08 : 621.431.36

В.М. ГОРБОВ, канд. техн. наук, В.С. МІТЕНКОВА, аспірант

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна, e-mail: v.gorbov@usmtu.edu.ua; vera.mitenkova@gmail.com*

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ СЕУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БІОДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ

Определены рациональные параметры топливных систем низкого давления судовых энергетических установок при использовании биодизеля и его смесей с дизельным топливом в разных пропорциях. Разработаны варианты принципиальных схем топливных систем СЭУ. Сопоставлены характеристики систем при использовании биодизельных топлив с разного сырья и их смесей с дизельным топливом.

The rational parameters of ship power plant low pressure fuel systems with utilizing of biodiesel fuels and its blends are determined. The variants of SPP fuel systems principal schemes are worked out. Systems' parameters with utilizing of biodiesel fuels manufactured out from different crude and its blends with diesel oil are compared with.

Постановка проблеми. Питання раціонального використання природних ресурсів і захисту навколишнього середовища від забруднення створюють перед судновою енергетикою проблему пошуку, впровадження і ефективного використання альтернативних палив (АП). Існуючі міжнародні та локальні акти відносно обмеження емісії з суден передбачають зменшення шкідливих викидів у атмосферу. Сьогодні більше 90 % суднових енергетичних установок (СЕУ) транспортних суден обладнано дизельними двигунами, які працюють переважно на різних видах нафтових палив.

Поступове впровадження АП, серед яких досить перспективною альтернативою дизельному паливу (ДП) є біодизель (БД), дасть змогу знизити залежність від нафтових палив та вирішити проблеми, пов'язані з використанням останніх у СЕУ. Впровадження на суднах біодизельних палив повинно супроводжуватися розробкою детальних рекомендацій відносно особливостей проектування, вибору схемних рішень, комплектації обладнанням, обслуговування під час експлуатації паливних систем (ПС) СЕУ. Розробка відповідних рекомендацій є **актуальною** науковою та практичною проблемою.

Аналіз літературних даних і публікацій. Досвід експлуатації суден на БД та його сумішах з ДП у Франції, Німеччині, США, Канаді, Великобританії підтверджує можливість широкого впровадження цього відновлюваного палива в СЕУ [1–3]. Перспективним для використання БД сегментом флоту є невеликі судна внутрішніх та прибережних районів плавання: рибальські, яхти, пасажирські, круїзні, дослідницькі, пороми, тощо. Це паливо в суміші з дизельним використовують на деяких військових кораблях у Франції та Великобританії [3, 4].

Можна визначити такі напрямки досліджень, пов'язані з можливістю використання біодизелю в енергетиці: вивчення фізико-хімічних та теплофізичних якостей; особливості роботи та характеристики дизельних двигунів; взаємодія з елементами паливних систем; екологічні аспекти застосування в двигунах. Серед проектів та публікацій, пов'язаних з вивченням якостей біодизельних палив можна виділити роботи по вивченню стабільності палив [5, 6] та дослідженню їх низькотемпературних властивостей [7]. Дані щодо робочих та екологічних показників і особливостей експлуатації дизельних двигунів на БД та його сумішах досить широко

представлені у вітчизняних та закордонних публікаціях [8, 9]. Є роботи щодо вивчення взаємодії біодизелю з конструкційними та ущільнювальними матеріалами [10].

Нажаль обмежена кількість робіт, в яких наводяться дані стосовно застосування біодизельних палив в судновій енергетиці. Серед них можна виділити посібник по застосуванню БД на рекреаційних судах [11] та кінцевий звіт по проекту BioMer [1]. Проект BioMer був реалізований в 2004 р. в провінції Квебек, Канада. Протягом декількох місяців 12 пасажирських суден експлуатувалися на чистому біодизелю (B100) та його сумішах з ДП з вмістом першого 5 % (B5) та 20 % (B20). Метою даного проекту, який координувався урядом Канади та місцевою владою Квебеку, було довести можливість ефективної роботи суден на БД та його сумішах. Але серед даних, викладених у кінцевому звіті відсутня інформація щодо впливу БД та його сумішей на характеристики паливних систем СЕУ.

Метою статті є розробка принципів схем паливних систем; обґрунтування раціональних параметрів ПС у випадках використання в СЕУ B100 з різної сировини та різних зразків, сумішей з різним вмістом біодизелю.

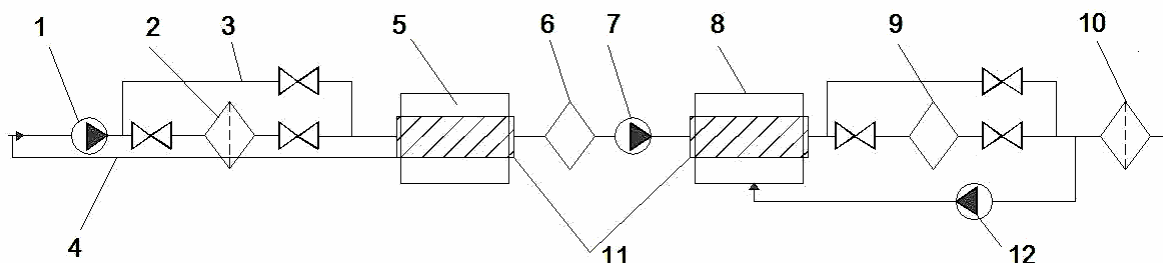
Викладення основного матеріалу. Біодизель досить близький за своїми фізико-хімічними характеристиками до ДП, його можна використовувати в тих же схемах і обладнанні з урахуванням специфічних характеристик. Можливий варіант, коли на судні існує одна паливна система для ДП, БД та їх сумішей, при почерговому використанні наведених палив та прийому паливних сумішей на борт у підготовленому стані. При іншому варіанті за аналогією з використанням важких та легких нафтових палив передбачається використання двох ПС зі взаємним резервуванням деякого обладнання та приготування паливних сумішей на борту [12]. Обидва варіанти мають свої переваги та недоліки та область більш ефективного використання.

На рис. 1–2 наведені можливі варіанти принципів ПС біодизелю. Схеми розроблено з урахуванням існуючих судових схем нафтових палив та характеристик БД. Схема на рис. 1 призначена для почергового використання на судні біодизелю та дизельного палива, або їх сумішей, отриманих заздалегідь. На рис. 2 зображена двопаливна система з можливістю отримання сумішей на судні та резервуванням обладнання ліній ДП та БД, на приймальних трубопроводах B100 передбачено супутникові обігрівачі.

Схему на рис. 1 можна використовувати при відносно малих потрібних запасах палива на рейс та частою експлуатацією судна при низьких температурах навколишнього середовища. Приймальний трубопровід обладнано супутниковим обігрівачем, який потрібен для підігріву B100 або сумішей із високою концентрацією біодизелю (від 30–35 %), фільтром грубого очищення. Для підігрівання палива у цистернах запасу та витратній передбачені зовнішні підігрівачі з електричними елементами. В системі встановлено два сепаратори – перед та після витратної цистерни, передбачена лінія повернення палива після другого сепаратору знов у витратну цистерну. Таке рішення пов'язане з відносно великою гігроскопічністю біодизеля, воно дасть змогу видалити надлишкову вологу. При використанні ДП та його сумішей з низьким вмістом БД достатньо одного сепаратора після цистерни запасу палива, а після витратної цистерни на схемі передбачається обвідний трубопровід подачі палива безпосередньо до фільтра тонкого очищення.

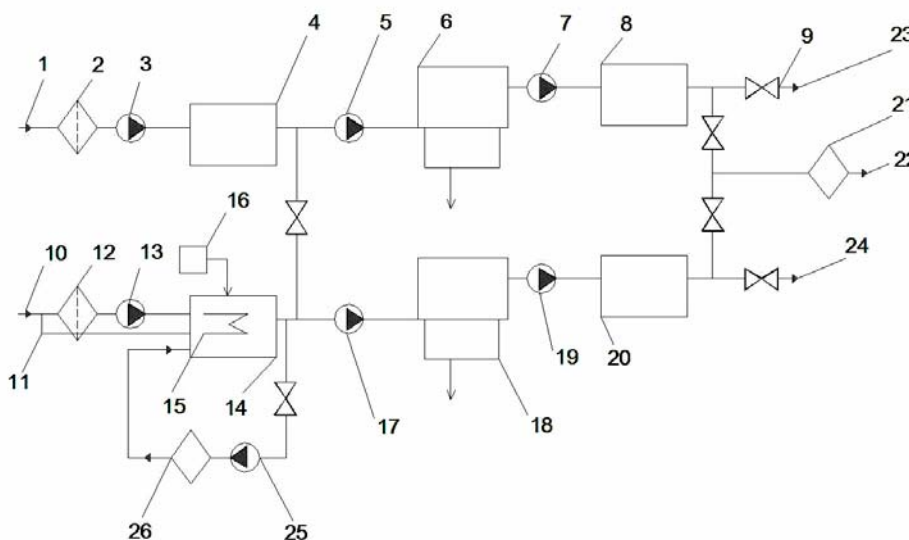
Особливістю схеми на рис. 2 є застосування при підготовці палив комбінованих очисних установок з вбудованим підігрівачем, в яких відбувається фільтрація та сепарація. Змішувач розташований після витратних цистерн. Передбачено три лінії підводу палива до двигунів: ДП, БД, їх сумішей. У цистерні запасу B100 передбачено

циркуляційний сепаратор для періодичного видалення води з палива при довготривалому зберіганні (вода може бути наявна у цистерні, або потрапляти різними шляхами протягом зберігання).



- 1 – насос перекачування палива; 2 – фільтр грубого очищення; 3 – обвідна лінія приймального трубопроводу; 4 – супутниковий обігрівач; 5 – цистерна запасу палива; 6, 9 – сепаратори; 7 – насос сепаратору; 8 – витратна цистерна; 10 – фільтр тонкого очищення; 11 – підігрівачі палива в цистернах зі зовнішнім обігрівом

Рис. 1. Принципова універсальна схема паливної системи для дизельного палива та біодизелю зі зовнішнім обігрівом цистерн



- 1 – приймальний трубопровід дизельного палива; 2, 12 – фільтри грубого очищення; 3, 13 – насоси перекачування палива; 4, 14 – цистерни запасу палива; 5, 17 – насоси установок очищення палива; 6, 18 – комбінована установка очищення палива (фільтр-сепаратор з вбудованим підігрівачем палива); 7, 19 – насоси подачі палив у витратні цистерни; 8, 20 – витратні цистерни; 9 – запірний клапан; 10 – приймальний трубопровід біодизелю; 11 – супутниковий обігрівач; 15 – занурений підігрівач палива; 16 – цистерна присадок для біодизеля; 21 – змішувач; 22 – суміш ДП та БД до двигуна; 23 – дизельне паливо до двигуна; 24 – біодизель до двигуна; 25 – насос сепаратору; 26 – сепаратор

Рис. 2. Принципова схема паливної системи дизельної установки з можливістю роботи на дизельному паливі, біодизелі та їх сумішах з комбінованими установками очищення палива

Для розробки паливних систем розглядалися такі їх характеристики: маса та об'єм запасів палива на рейс, потужність приводів насосів перекачування палива, швидкість фільтрації та сепарації. Співставленні значення характеристик систем при використанні В100 з різної сировини (таблиця), чистого біодизелю з однієї сировини різних зразків, сумішей з низьким вмістом БД (до 30 %) та вмістом від 20 до 100 %. Розрахунки проводилися згідно з матеріалами, представленими в [12, 13].

В таблиці представлені результати при використанні таких палив: ДП, ТЖМЕ – метиловий ефір з тваринного жиру, РМЕ – ріпаково-метиловий ефір, СМЕ – соєво-метиловий ефір, ПМЕ – пальмово-метиловий ефір, СНМЕ – соняшниково-метиловий ефір, ВОМЕ – метиловий ефір використаної кухарської олії. Фізико-хімічні характеристики біодизельних палив, які являють собою метилові ефіри жирних кислот, приймалися згідно із даними представленими в [14] для ТЖМЕ, СМЕ, ПМЕ та СНМЕ, в [15] для ВОМЕ та РМЕ. Дані представлені у відносному вигляді, за одиницю прийняті відповідні значення для ДП. Аналіз наведених матеріалів свідчить про те, що в залежності від вихідної сировини потрібна маса палива може збільшуватися майже на 17 %. Потрібний відносний об'єм паливних цистерн збільшується до 9,5 %, що пов'язано з більшою густиною біодизельних палив. Для перекачування В100 потрібна потужність насосів може збільшуватися до 50 %. Швидкість фільтрації може зменшуватися до 2,5 разів, сепарації – майже втричі.

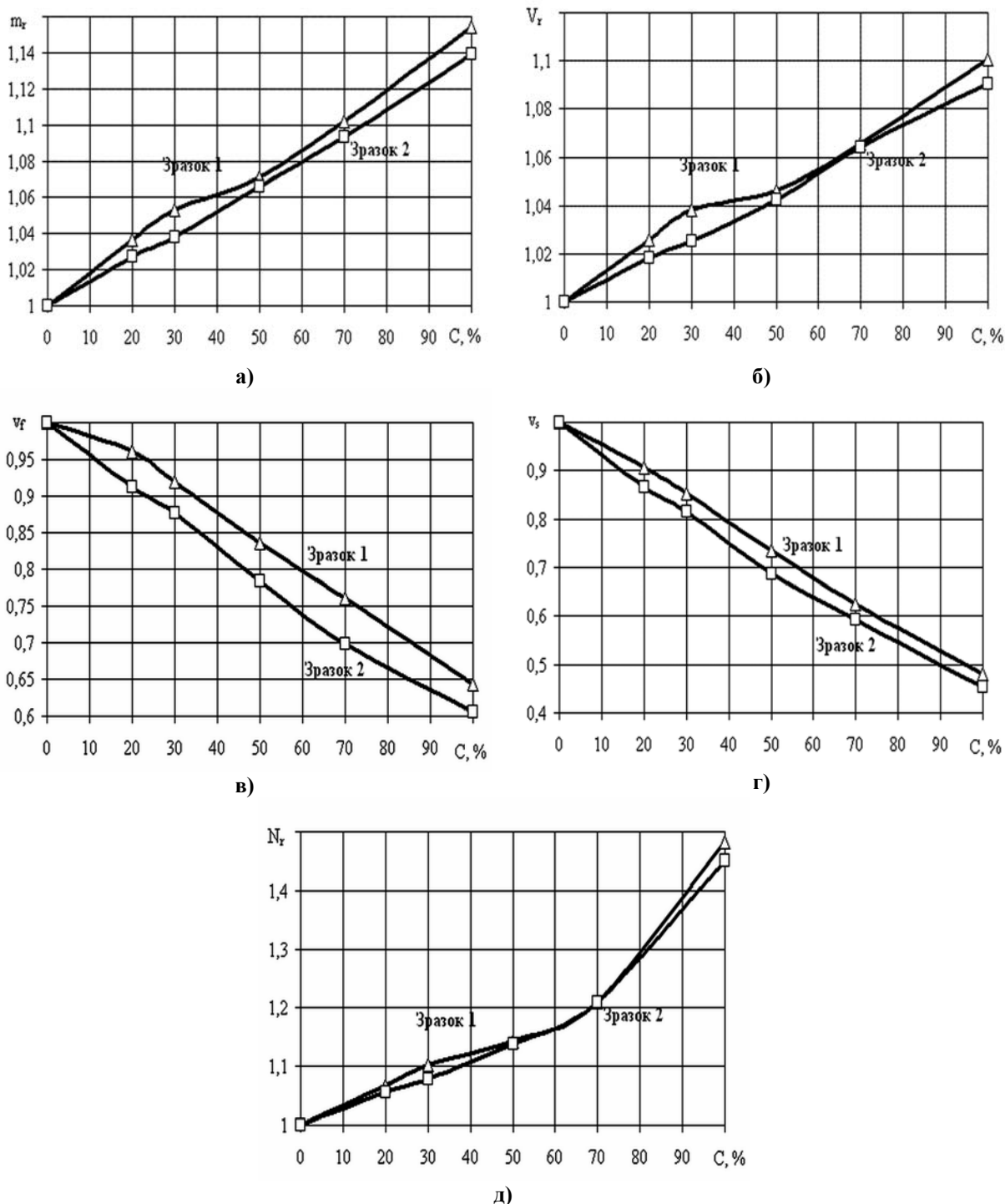
Таблиця. Характеристики паливних систем СЕУ при використанні дизельного палива та В100 з різної сировини

Характеристика	Паливо						
	ДП	ТЖМЕ	РМЕ	СМЕ	ПМЕ	СНМЕ	ВОМЕ
Маса запасів палива	1	1,089	1,165	1,166	1,149	1,14	1,125
Ємність паливних цистерн	1	1,019	1,095	1,088	1,084	1,075	1,086
Потужність приводу насосу перекачування	1	1,287	1,529	1,486	1,526	1,456	1,509
Швидкість фільтрації	1	0,593	0,506	0,595	0,43	0,533	0,418
Швидкість осадження часток води в сепараторі	1	0,3944	0,3482	0,3885	0,3037	0,3763	0,3444

Змінення відносних характеристик паливних систем при використанні палив з вмістом БД від 0 (чисте ДП) до 100 % (В100) показані на рис. 3. Показники визначалися при використанні ДП з низьким вмістом сірки та біодизелю з сої для двох зразків. Для першого зразка були взяті ДП з цетановим числом 47,1 та В100 із метановим числом 55, для другого – з 43,5 та 51,1, відповідно. Більш докладно характеристики палив та їх сумішей представлено в роботі [16]. З рис. 3 видно, що характеристики паливної системи пропорційно змінюються у залежності від концентрації біодизелю в суміші та мають практично лінійну залежність. Відносна маса запасів палива збільшується майже на 16 %, об'єм паливних цистерн – на 10 %, потужність приводів насосів – майже на 50 %, швидкість фільтрації та сепарації зменшуються на 35–40 % та 50–55 %, відповідно.

Також було проведено порівняння параметрів ПС при використанні В100 з однієї сировини 27 різних зразків, фізико-хімічні характеристики яких відповідають міжнародним стандартам якості і представлені в [5]. Різниця між значеннями густини розглянутих палив до 1,5 %, в'язкості – до 18,2 %. Пропорційно густині та в'язкості

змінюється ємність паливних цистерн та швидкість фільтрації, відповідно на 1,54 % та 18,4 %. Потужність приводів перекачувальних насосів для різних В100 зростає лише на 3,5–4 %, а швидкість сепарації може зменшуватися майже на 22 %.



а – відносна маса запасів палива; б – відносна ємність паливних цистерн;
 в – відносна швидкість фільтрації; г – відносна швидкість осадження часток води в сепараторі;
 д – відносна потужність приводу насоса перекачування
 Рис. 3. Характеристики паливних систем СЕУ при використанні дизельного палива, В100 та їх сумішей в різних пропорціях

Аналогічні розрахунки були проведені і для сумішей дизельного палива та біодизелю з вмістом останнього до 30 %, такі суміші найчастіше використовуються в двигунах, їх фізико-хімічні характеристики представлено в [5]. Переважна кількість зразків – це В20. В залежності від вмісту біодизелю в суміші (7–28 %) та його властивостей маса запасів палива збільшується на 2,7 %, ємність паливних цистерн – на 1,7 %, потужність приводів насосів – на 8,7 %, швидкість фільтрації та сепарації знижується на 22,3 та 24 %, відповідно, порівняно з дизельним паливом.

Інформація стосовно теплофізичних властивостей біодизелю майже відсутня. В роботі [17] представлені результати експериментального дослідження ізобарної теплоємності біодизелю з ріпакової олії. Обробка наявних в роботі даних дала змогу визначити залежність теплоємності, Дж/(кг·град), від температури ($15 \leq t \leq 280$ °С):

$$c_p = 4,606t + 2027,3.$$

В даному діапазоні температур теплоємність біодизелю перевищує значення c_p для ДП в 1,6–3,2 рази (менша різниця відповідає більшим t). Таким чином для підігріву однакової маси палива для В100 потрібно в 1,6–3,2 рази більше теплової або електричної енергії порівняно з ДП.

Висновки:

1. Запропоновано варіанти схем паливних систем при використанні БД: 1) на судні одна універсальна паливна система для ДП, БД та їх сумішей в різних пропорціях, вони найбільше підходить для малих суден з жорсткими масогабаритними обмеженнями, при умові почергового використання палив на судні та прийому сумішей ДП та БД у готовому стані; 2) використовується дві паливні системи зі взаємним резервуванням деякого обладнання та приготуванням паливних сумішей безпосередньо на борту.

2. Встановлено, що характеристики паливних систем для біодизелю залежать від вихідної сировини, вмісту БД в суміші, фізико-хімічних показників.

3. Використання біодизельних палив в паливних системах СЕУ призводить до зростання маси запасів палива до 16 %, об'єму паливних цистерн – до 10 %, потужності приводів насосів – до 50 %, необхідної для підігріву палива енергії – в 1,6–3,2 рази, швидкість фільтрації та сепарації можуть зменшуватися на 60 % та 65 %, відповідно. При використанні сумішей з низьким вмістом біодизелю ємність паливних цистерн та маса запасів палива збільшуються незначно, витрати енергії на перекачування палив зростають майже на 10 %, швидкість фільтрації та сепарації знижуються на 22 % та 24 %, відповідно. Це буде визначати рівень раціональних параметрів паливних систем СЕУ при проектування та підборі обладнання.

Подальші дослідження в даному напрямку будуть спрямовані на розробку детальних рекомендацій щодо проектування та експлуатації паливних систем СЕУ при використанні БД та його сумішей з дизельним паливом, розробку комплексного критерію ефективності використання біодизелю на судах.

Література

1. BioMer: Biodiesel demonstration and Assessment for tour boats in the Old Port of Montreal and Lacine Canal National Historic Site. Final report. – Québec, Canada, 2005. – 67 p.

2. *Hendrix Muriel L.* Deep Fat in the Tank Marine Biodiesel makes headway in Maine // The working Waterfront. – 2007. – July. – Режим доступа: <http://www.workingwaterfront.com/articles/Deep-Fat-in-the-TankMarine-Biodiesel-makes-headway-in-Maine/11740/>.
3. *Scott R.* UK biodiesel study fuels debate on the practicalities for naval vessels. – Jane's International Defence Review. – 2008. – vol. 41. – June. – Режим доступа: www.bmtdsl.co.uk/BMT/bmt_media/bmt_media/33/ArticlefromJanesCJanesInfoGroup.pdf.
4. *Горбов В.М.* Перспективы использования биотоплива в судовых энергетических установках / В.М. Горбов, В.С. Митенкова // Судходство. – 2007. – № 1-2 (127). – С. 64-65.
5. Survey of the Quality and Stability of Biodiesel and Biodiesel Blends in the United States in 2004 / Technical report, NREL/TP-540-38836; R.L. McCormick, T.L. Alleman, M. Ratcliff and others. – National Renewable Energy Laboratory, USA, 2005. – 60 p.
6. *Westbrook S.R.* An Evaluation and Comparison of Test Methods to Measure the Oxidation Stability of Neat Biodiesel. Subcontract No. ACE-3-33075-01. – Southwest Research Institute, San Antonio, USA, 2005. – 35 p.
7. Biodiesel cold weather blending study. – The National Biodiesel Board, USA, 2005. – 25 p.
8. *Марченко А.П.* Расчетное исследование особенностей процесса дизеля СМД-31 при его работе на традиционном дизельном топливе и метиловых эфирах рапсового масла / А.П. Марченко, В.Г. Семенов, И.И. Сукачев, О.Ю. Линьков // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. трудов. – Харьков: ГАЭКУ «ХАИ», 2000. – Вып. 15. – Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 155-157.
9. *Holden B.* Effect of biodiesel on diesel engine nitrogen oxide and other regulated emissions. Project No. WP-0308. – California: Naval facilities engineering service center, 2006. – 110 p.
10. *Frame E.* Elastomer Compatibility Testing of Renewable Diesel Fuels / E. Frame, R.L. McCormick; Technical Report, NREL/TP-540-38834. – National Renewable Energy Laboratory, USA, 2005. – 21 p.
11. *Wedel von R.* Technical handbook for marine biodiesel in recreational boats. Subcontract No. ACG-7-16688-01. – California: U.S. Department of Energy, 1999. – 25 p.
12. Системы судовых энергетических установок: Учебное пособие / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, А.Я. Шквар и др. – Л.: Судостроение, 1990. – 376 с.
13. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
14. *Clements D.L.* Blending rules for formulating biodiesel fuel, University of Nebraska, 1996, p. 44-53. – Режим доступа: www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19960101_gen-277.pdf.
15. *Lebedevas S., Vaicekauskas A.* Research into the application of biodiesel in the transport sector of Lithuania // TRANSPORT – 2006. – V. XXI, № 2. – P. 80–87.
16. *Schumacher L.* The Physical & Chemical Characterization of Biodiesel Low Sulfur Diesel Fuel Blends / L. Schumacher, A. Chellappa, W. Wetherell and others. – The National Biodiesel Board University of Missouri, 1995. – 85 p.
17. *Goodrum J.W.* Review of biodiesel research at university of Georgia. – Режим доступа: www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19960601_gen-073.pdf.