

УДК 629.735.03.063.6:662.75.001.12(045)

¹О.Л. Матвєєва, канд. техн. наук
²Т.В. Михалевська, канд. фіз.-мат. наук**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
РЕАКТИВНИХ ПАЛИВ**¹Кафедра технологічного обладнання, НАУ, e-mail:mol@nau.edu.ua²Кафедра екології, НАУ*Наведено результати дослідження експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив. Запропоновано інтегровану систему оцінки її рівнів.***Постановка проблеми**

У процесі експлуатації палив, від виробництва до його згоряння в паливній системі транспортного засобу, під впливом зовнішніх умов якості пального постійно погіршується завдяки процесам окиснення та утворення осаду. На сьогодні в зв'язку з обмеженістю нафтових ресурсів актуальною залишається задача поліпшення енергетичних властивостей вуглеводневих палив.

Аналіз досліджень та публікацій

Для забезпечення високої енергетичної ефективності реактивного палива, крім самої теплоти згоряння (>42500 кДж/кг), необхідно дотримання цілої низки вимог [1–4], зокрема:

- низька в'язкість ($\approx 1 \text{ мм}^2/\text{с}$);
 - вміст водню (>14%);
 - високий стехеометричний коефіцієнт ($l_0 > 15$);
 - повне окиснення до газоподібного стану всіх компонентів палив у камері згоряння (КЗ) за умов відсутності механічних домішок, смол та ін.
- В'язкість і вміст водню в паливі взаємопов'язані з його вуглеводневим складом. Стехеометричний коефіцієнт визначає відношення маси повітря, теоретично необхідної для повного згоряння палива, до маси цього палива (для реактивних палив $l_0 = 14,8$).

Повне окиснення реактивних палив у КЗ залежить від багатьох чинників, зокрема, вуглеводневого складу палив, конструкції КЗ, схем подавання повітря в зону горіння та ін. Цьому питанню була приділена увага в працях [4–9]. Що ж стосується умов забезпечення повного окиснення всіх компонентів палив до газоподібного стану у КЗ, то виявляється, що окремі вуглеводневі компоненти не в змозі дійти газоподібного стану окиснення при заданих робочих параметрах організації процесу горіння. Пояснюється це недостатністю створених умов для кожного з них, враховуючи їх фізико-хімічні особливості [3], що сприяє появі сажі в продуктах згоряння. Прикладом таких компонентів палив є смоли, гетероорганічні сполуки та вуглеводні з компактною структурою.

Особливості неповного окиснення залежать від самого процесу горіння вуглеводнів та відносно високої міцності їх внутрішньомолекулярних зв'язків. Указаних компонентів у реактивних паливах може бути до 3%, зокрема, біциклоароматичних – до 1% [1; 2; 5–7; 9; 10].

Ураховуючи все це, а також експериментальне підтвердження факту зменшення теплоти згоряння від вмісту твердої дисперсної фази (ТДФ) [11], можна стверджувати, що коефіцієнт повноти згоряння η_r^ϕ залежить не тільки від умов організації процесу згоряння в КЗ, а й від фізико-хімічного складу палив: вуглеводневого та ступеня окиснення і забруднення.

Показник експлуатаційної енергоефективності $E_n^{\text{еф}}$ [12] визначаємо як залежність між показником енерговтрат θ_e , нижчою теплотою згоряння палива на момент його виробництва Q_n^0 , густиною ρ та коефіцієнтом повноти згоряння η_r^ϕ :

$$E_n^{\text{еф}} = \theta_e Q_n^0 \rho \eta_r^\phi. \quad (1)$$

Являє інтерес дослідження характеру взаємозв'язку між $E_n^{\text{еф}}$, η_r^ϕ та θ_e .

Постановка завдання – продовження дослідження енергетичних властивостей палив шляхом моделювання експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив і розробки системи оцінки її рівнів.

Моделювання експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив

Аналіз залежності (1) проведемо в декілька етапів, установлюючи характер взаємозв'язку між змінними в такому порядку:

- для $E_1^{\text{еф}}$: Q_n^0 – змінна, $\theta_e, \rho, \eta_r^\phi$ – сталі ($\theta_e = 0,9, \rho = 834 \text{ кг/м}^3, \eta_r^\phi = 0,9$);
- для $E_2^{\text{еф}}$: η_r^ϕ – змінна, Q_n^0, θ_e, ρ – сталі ($Q_n^0 = 43025 \text{ кДж/кг}, \theta_e = 0,9, \rho = 834 \text{ кг/м}^3$);
- для $E_3^{\text{еф}}$: θ_e – змінна, Q_n^0, η_r^ϕ, ρ – сталі ($Q_n^0 = 43025 \text{ кДж/кг}, \eta_r^\phi = 0,9, \rho = 834 \text{ кг/м}^3$);

– для E_4^{ef} : ρ – змінна, $Q_n^o, \eta_r^\phi, \theta_e$ – сталі ($Q_n^o = 43025$ кДж/кг, $\eta_r^\phi = 0,9$, $\theta_e = 0,9$). Межі варіювання чинників беремо такими: $\theta_e = 0,80 \div 1,0$, $Q_n^o = 42500–43550$ кДж/кг, $\rho = 800 \div 906$ кг/м³, $\eta_r^\phi = 0,80 \div 1,0$. Діапазон зміни θ_e вибрано, виходячи з попередньої оцінки енерговтрат [11–15] за умов згоряння окисненого палива із врахуванням особливостей програми моделювання, що використовується. Незначний інтервал зміни $\Delta Q_n \leq 1050$ кДж/кг вибрано, враховуючи, що даний показник суттєво незмінний і його значення відповідає теплоті згоряння палива на момент його виробництва. Межі варіювання ρ обрано, керуючись галузевими нормативами якості палив на момент їх заправлення в літак. Залежність експлуатаційної енергоемності палива від температури визначається із врахуванням $\rho = f(T)$ [1; 2]. Беручи до уваги умови поставленої задачі щодо визначення характеру та ступеня залежності E_4^{ef} – саме від процесів окиснення та забруднення палив під час експлуатації через показники θ_e, η_r^ϕ , потенційну змінну $\rho = f(T)$ у даному випадку ми не враховуємо. Межі варіювання для η_r^ϕ вибрано, враховуючи результати аналізу науково-технічних джерел [12]. Результати факторного (регресійного) аналізу $E_4^{ef} = f(Q_n^o, \theta_e, \eta_r^\phi, \rho)$ показано на рис. 1.

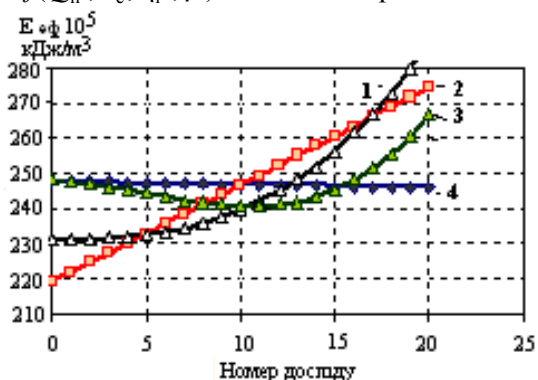


Рис. 1. Залежність експлуатаційної енергоефективності від варіюваних чинників: 1 – E_2^{ef} , 2 – E_3^{ef} , 3 – E_1^{ef} , 4 – E_4^{ef}

Аналіз отриманих даних експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив $E_4^{ef} = f(Q_n^o, \theta_e, \eta_r^\phi, \rho)$ при побудові просторової математичної моделі із застосуванням пакету прикладних програм «STATISTICA» показав, що

визначаючим чинником впливу на енергоефективність E_n^{ef} є густина палива.

З метою більш глибокої оцінки експлуатаційної енергоефективності палив при побудові моделі використаємо результати експериментальних даних залежності $Q_n = f(C_{ф.см}, C_{ТДФ})$ (рис. 2), що враховує взаємозв'язок фактичної теплоти згоряння із вмістом смол та ТДФ, тобто окисненням і забрудненням палива [12; 13].

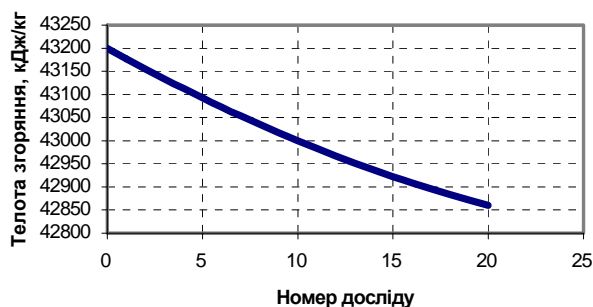


Рис. 2. Взаємозалежність нижчої теплоти згоряння від порядку дослідю

Отримана математична просторова модель (рис. 3) описується залежністю:

$$Z = 66,7712 - 0,0033x + 0,3423y + 4,0688E^{-8}x^2 - 2,6475E^{-7}xy - 2,0215E^{-7}y^2,$$

де $E_4^{ef} = (Z)$, $Q_n = (x)$, $\rho = (y)$ і визначає характер взаємозв'язку експлуатаційної енергоефективності від густини палив та змін фактичної теплоти згоряння з врахуванням процесу окиснення вуглеводневих палив під час експлуатації.

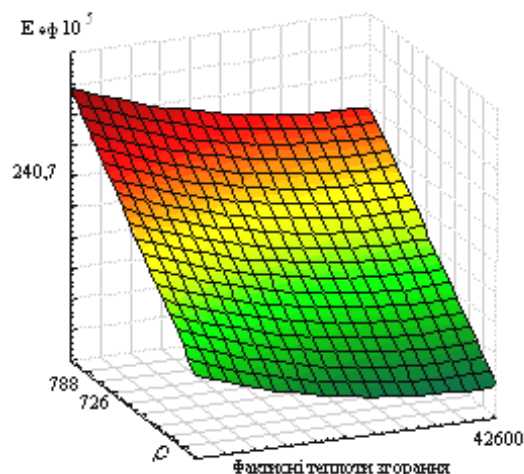


Рис. 3. Модель експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив з врахуванням процесу їх окиснення

Аналіз чинників даної нелінійної регресійної моделі підтвердив, що визначаючий вплив на неї здійснює саме показник густини.

Вагомість впливу чинника густини палива порівняно з іншими складовими залежності

експлуатаційної енергоефективності можна пояснити, по-перше, співвідношенням їх абсолютних значень між собою, по-друге, відносно невеликим (у математичному розумінні) ступенем впливу процесу окиснення на зміну енергетичних показників палива, що добре узгоджується з практикою експлуатації.

Ураховуючи отримані результати досліджень, можна вважати, що з погляду науково-методологічного підходу, являє інтерес подальше дослідження експлуатаційної енергоефективності. Оскільки результати досліджень показали визначальний вплив на експлуатаційну енергоефективність густини вуглеводневих палив, а при цьому добре відомо, що даний показник якості зазнає суттєвих змін від температурного чинника в процесі експлуатації повітряного корабля (ПК), є припущення, що досліджувана нами модель експлуатаційної енергоефективності теж повинна зазнати певних змін.

Для з'ясування цього спочатку більш детально розглянемо можливі зміни ρ . Взаємозв'язок даного показника з теплою згоряння закладено в поняття об'ємної теплоти згоряння або енергосмістності палива, що має першочергове значення при розрахунках дальності польоту із врахуванням об'єму паливних баків ПК. Визначення ж кількості палива на політ здійснюється при використанні $\rho_{20^\circ\text{C}}$. У розрахунках економічності двигуна враховується масова теплота згоряння, що не залежить від температури.

У разі надходження палива в двигун ПК його температура може змінюватися у діапазоні від мінус 55 до плюс 450 °С (до речі, на виході з паливно-масляного радіатора температура палива може досягати 90 °С). Очевидно, що ρ теж зазнає змін.

Критична густина реактивного палива може бути визначена за допомогою апарату математичних формул та врахуванням їхнього групового індивідуального вуглеводневого складу [14–15] з достовірністю не менш ніж 98%. Для досліджуваних нами авіаційних палив критичну густину згідно з даними праці [1] наведено в таблиці.

Критична густина реактивних палив

Паливо	ТС-1	РТ	Т-6	Т-8
$\rho_{\text{кр}}, \text{кг/м}^3$	254	247	251	249

Для визначення меж варіювання густини палива при експлуатаційних умовах його надходження до КЗ будемо керуватися даними ρ палив у

рідкому стані з врахуванням лінії насичення, отриманими М.Ф. Дубовкіним та Л.Д. Абашиною [1, с. 43].

Отже, на даному етапі дослідження закономірності змін E_4^{ef} від густини палив, враховуючи діапазон змін експлуатаційних температур палива в паливній системі двигуна, прийнемо таку залежність ρ від номера досліду (рис. 4).

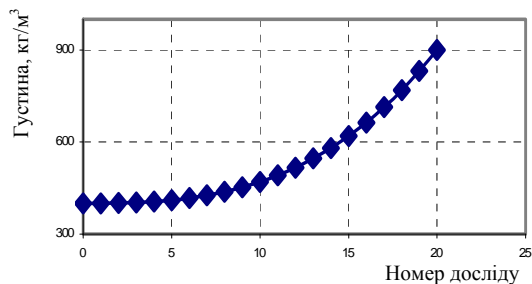


Рис. 4. Залежність густини палива від номера досліду

Шкала номера досліду взаємоузгоджена з залежністю концентрації ТДФ, що розглядалася в праці [11]. Межі варіювання $Q_n^0, \theta_e, \eta_r^f$ порівняно з попередніми моделюваннями залишаємо без змін.

Результати кореляційно-регресійного аналізу засвідчили наявність суттєвого кореляційного зв'язку між досліджуваними параметрами. Коефіцієнти кореляції часткові та загальних для наведених моделей даної роботи більше 0,7, а розрахунковий критерій Фішера менше табличного в межах достовірності 0,98, що вказує на адекватність побудованих моделей. Моделі досліджуваної поверхні рішень E_4^{ef} від варіюваних чинників із врахуванням високотемпературних змін ρ палива наведено на рис. 5, 6.

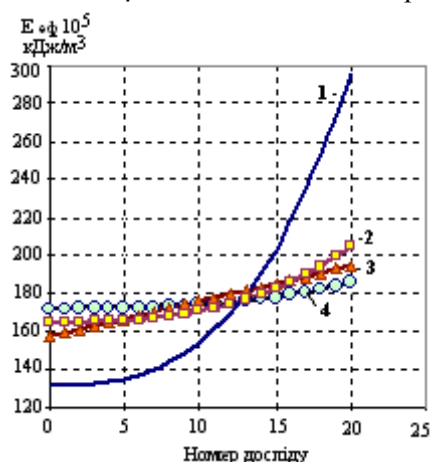


Рис. 5. Залежність експлуатаційної енергоефективності від варіюваних чинників із врахуванням високотемпературних змін ρ :
1 – E_4^{ef} ; 2 – E_3^{ef} ; 3 – E_2^{ef} ; 4 – E_1^{ef}

Отримана математична просторова модель (рис. 6) описується залежністю:

$$Z = 207,4794 - 7,6363x - 0,0204y + 0,0484x^2 + 0,0171xy - 0,0001y^2,$$

де $E_4^{ef} = (Z)$, номер досліду = (x) , $\rho = (y)$ і визначає характер взаємозв'язку експлуатаційної енергоефективності від густини палив із врахуванням її високотемпературних змін.

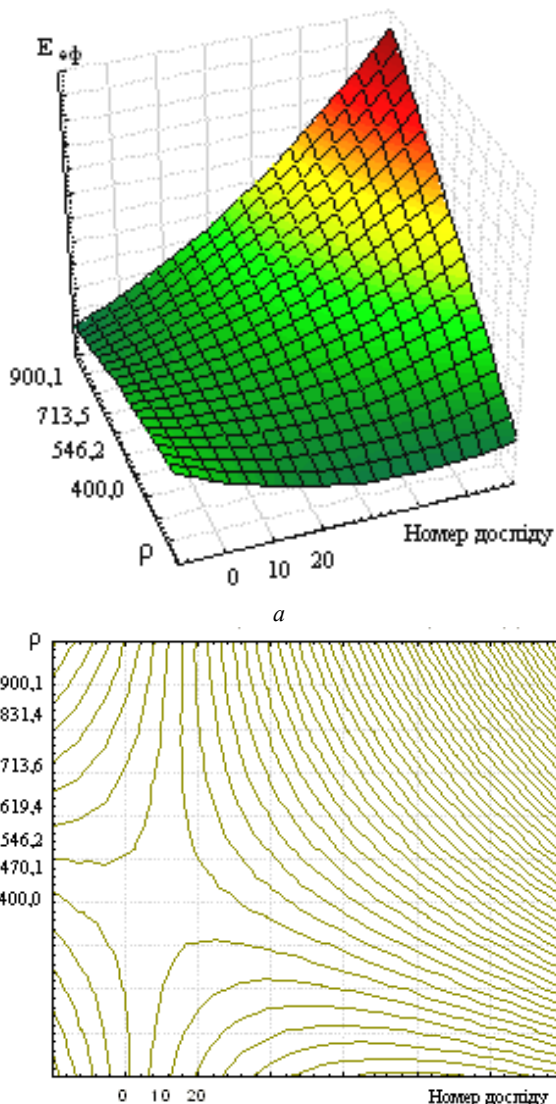


Рис. 6. Модель експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив залежно від зміни його температури:
 а – просторова модель; б – ізолінійна модель

Аналіз отриманих результатів показав, що поверхня рішень виявила критичні точки у діапазоні значень показника ρ від 550 до 400 $\text{кг}/\text{м}^3$, що відповідає температурі палив ТС-1, РТ приблизно від 360 до 250 $^{\circ}\text{C}$ [1, с. 43].

Пояснюючи таку закономірність, можна припустити, що в даній області значень при активному випаровуванні палив і досягненні насиченого

стану має місце нестабільний стан густини палив, що може, наприклад, при температурі 360 $^{\circ}\text{C}$ водночас «зірвати» її значення з 400 до 250 $\text{кг}/\text{м}^3$, тобто до точки критичної густини.

Оскільки перевірити таке твердження на експериментальному рівні на даному етапі досліджень неможливо, на нашу думку, підтвердженням цього може слугувати характерна залежність $\rho = f(T)$, наведена у праці [1, с. 49].

Подача палива в ПК здійснюється за об'ємною характеристикою – витратою. А це значить, що на заданому режимі роботи газотурбінного двигуна (ГТД) при постійній роботі паливних насосів за умов появи нестабільного стану ρ палива в паливопроводі та різкого її зменшення до значень $\rho_{кр}$, може змінитися масова подача палива в двигун, що призведе до зниження його потужності. Підтримання функціонування двигуна на заданому режимі призведе до підвищення витрати палива.

Отже, підсумовуючи результати дослідження експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив, можна зазначити, що процеси окиснення та забруднення вуглеводневих палив здійснюють негативний вплив на теплоту та повноту згоряння палива, що знайшло своє відображення в просторових 3-D моделях.

Систематизувавши результати впливу варіюваних чинників на експлуатаційну енергоефективність, можна визначити її рівні. При цьому мінімальні значення Q_n^o , ρ відповідають міні-мальним нормативам для цих показників згідно з галузевими стандартами, а θ_e, η_r^{ϕ} взяті в межах 0,8–1,0. Визначені рівні E_4^{ef} наведено на рис. 7.

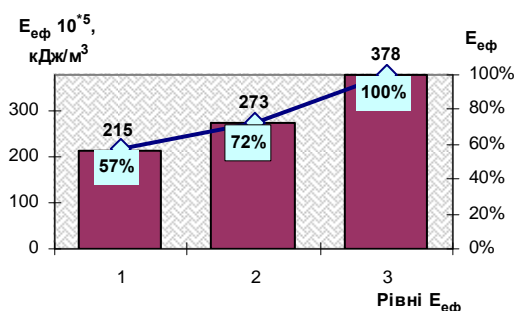


Рис. 7. Рівні експлуатаційної енергоефективності реактивних палив:
 1 – низький; 2 – середній; 3 – високий (ідеальний)

Так, для палив з густиною $\rho = 780 \text{ кг}/\text{м}^3$ за умов їх окиснення та наявності ТДФ при $\theta_e = 0,8, \eta_r^{\phi} = 0,8$ величина E_4^{ef} знаходиться на

низькому рівні, щодо палив, які не містять високомолекулярних сполук окиснення і в них абсолютно відсутні механічні домішки мають значення E_4^{ef} , що відповідають ідеальному рівню.

Проведений аналіз практики експлуатації ПК дає підстави стверджувати, що значення E_n^{ef} , як правило, знаходиться в межах середнього рівня. Безумовно, досягнення ідеального рівня експлуатаційної енергоефективності дає всі підстави стверджувати, що енергетичні властивості палив реалізовані повністю. Але для досягнення такого рівня необхідно щонайменше забезпечити стовід-соткову неможливість окиснення палив та відсутність продукування в них ТДФ у процесі експлуатації: під час транспортування та зберігання.

На жаль, забезпечення виконання таких умов на сьогодні достатньо проблематично. Можна розглянути інший шлях досягнення найвищого рівня E_4^{ef} і збільшити чи відновити втрачене значення теплоти згоряння, застосувавши методи активації палива. Безсумнівно, що всі напрями підвищення E_4^{ef} повинні ґрунтуватися на системі науково-технічних і організаційно-технічних заходів, які будуть розглянуті у майбутньому.

Висновки

1. Запропоновано системний підхід щодо визначення експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив, розроблено інтегровану систему оцінки її рівнів.
2. Розроблено математичну модель експлуатаційної енергоефективності вуглеводневих палив, що дозволяє оцінити ступінь впливу фізико-хімічного складу палива на процес його згоряння.
3. Здобуло подальший розвиток знання вагомості внеску густини палив при створенні умов максимального забезпечення їх енергоефективності.
4. Показано, що при виникненні високотемпературних змін густини палив у паливній системі ГТД імовірно виникнення нестабільного критичного стану густини, яке може призвести до підвищення витрати палива під час польоту.

Література

1. *Физико-химические* и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справ. / Н.Ф. Дубовкин,

В.Г. Маланичева, Ю.П. Массур. Е.П. Федоров. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

2. *Химмотология* в гражданской авиации: Справ. / В.А. Пискунов, В.Н. Зрелов, В.Т. Василенко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.

3. *Литвинов А.А.* Основы применения ГСМ в гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1987. – 312 с.

4. *Пискунов В. А., Зрелов В. Н.* Влияние топлив на надёжность реактивных двигателей и самолетов: Химмотологическая надёжность. – М.: Машиностроение, 1978. – 270 с.

5. *Химмотология* ракетных и реактивных топлив / А.А. Братков, Е.П. Серегин, А.Ф. Горенков и др.; Под ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1987. – 304 с.

6. *Папок К. К., Пискунов В. А., Юрени П. Г.* Нагары в реактивных двигателях. – М.: Транспорт, 1971. – 112 с.

7. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Под ред. В.Е. Дорошенко. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

8. *Образование* и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Чигир. – М.: Машиностроение, 1981. – 497 с.

9. *Христич В.А., Тумановский А.Г.* Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. – К.: Техніка, 1983. – 144 с.

10. *Данилов А.М.* Присадки и добавки. Улучшение экологических характеристик нефтяных топлив. – М.: Химия, 1996. – 224 с.

11. *Матвеева О.Л., Михалевська Т.В.* Моделирование зміни енергетичних властивостей палив // Технол. системи. – 2005. – №4. – С. 36–42.

12. *Матвеева О.Л.* Визначення енергетичної ефективності використання вуглеводневих палив // Наук.-практ. пробл. моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій. – 2004. – № 4. – С. 101–107.

13. *Матвеева О.Л., Тітова О.С.* Окиснювальні процеси в системі забезпечення енергетичної ефективності вуглеводневих палив // Технол. системи. – 2004. – № 2 (22). – С. 63–66.

14. *Абросимов В.Ф.* Методы расчета теплофизических свойств газов и жидкостей. – М.: Химия, 1974. – 241 с.

15. *Столяров Е.А., Орлова Н.Г.* Расчет физико-химических свойств жидкостей. – М.: Химия, 1976. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.05.

Е.Л. Матвеева, Т.В. Михалевская

Системный подход исследования эксплуатационной энергоэффективности реактивных топлив

Приведены результаты исследования эксплуатационной энергоэффективности углеводородных топлив. Предложена интегрированная система оценки ее уровня.

H.L. Matvyeyeva, T.V. Mikhalevskaya

Systems approach of research of operating energoeffektivnosti of reactive fuels

Results are resulted of research of operating energoeffektivnosti of hydrocarbon fuels, the integrated system is offered of estimation of its levels.