

М. Н. Рахимов (д.т.н., проф.)^а, Ф. Ш. Вильданов (к.т.н, доц.)^б,
С. В. Фаррахов (магистрант), М. М. Якупов (асп.)

АНАЛИЗ ТЕПЛОТВОРНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЫСКООКТАНОВЫХ КОМПОНЕНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
^а кафедра технологии нефти и газа; ^б кафедра нефтехимии и химической технологии
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: farhad_ufa@mail.ru

M. N. Rakhimov, F. Sh. Vil'danov, S. V. Farrakhov, M. M. Yakupov

ANALYSIS OF THE HEATING VALUE OF HIGH-OCTANE COMPONENTS OF MOTOR GASOLINES

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: farhad_ufa@mail.ru

Представлены результаты исследования зависимости теплотворной способности высокооктановых компонентов товарных автомобильных бензинов (риформат и изомеризат) от их углеводородного состава. Показано, что в составе риформата преобладают ароматические углеводороды, суммарное содержание которых составляет около 70%. Среди последних преобладают углеводороды C₇, C₈ и C₉ (19.6, 20.6 и 15.3 % соответственно). Суммарное содержание данных углеводородов составляет 81% от общего содержания ароматики в риформате. Изомеризат более, чем на 97%, состоит из парафинов, а суммарное содержание в них парафинов *изо*-строения превышает 80%. Расчетами показано, что теплотворная способность типовой пробы риформата примерно на 7% ниже, чем изомеризата (42.2 и 45.1 кДж/кг соответственно).

Ключевые слова: автомобильные бензины; ароматические углеводороды; высокооктановый компонент; изомеризат; парафины; риформат; теплосодержание; теплотворная способность; углеводородный состав.

На сегодняшний день доля топлив на основе углеводородного сырья в мировом энергобалансе остается доминирующей. Одним из показателей топлив, характеризующим количество тепла, выделяющегося при его полном сгорании, является удельная теплота сгорания, или теплотворная способность. Теплотворная способность как органического топлива, так и составляющих его индивидуальных компонентов, дает представление о том, какое количество тепла можно получить при полном сжигании единицы массы (1 кг) твердого,

The results of a study of the dependence of the calorific value of high-octane components of commercial motor gasoline (reformate and isomerate) on their hydrocarbon composition are presented. It has been shown that aromatic hydrocarbons predominate in the composition of the reformate, the total content of which is about 70%. Among the latter, hydrocarbons C₇, C₈ and C₉ predominate (19.6, 20.6 and 15.3 %, respectively). The total content of these hydrocarbons is 81% of the total aromatic content in the reformate. The isomerate consists of more than 97% paraffins, and the total content of paraffins of iso-structure in them exceeds 80%. Calculations show that the calorific value of a typical sample of reformate is approximately 7% lower than that of isomerize (42.2 and 45.1 kJ/kg, respectively).

Key words: aromatic hydrocarbons; calorific value; heat content; high octane component; hydrocarbon composition; isomerize; motor gasoline; paraffins.

жидкого или единицы объема (1 м³) газообразного топлива. Различают высшую и низшую теплотворную способность топлив¹. В случае оценки теплотворной способности топлив для двигателей внутреннего сгорания пользуются низшей теплотворной способностью. Следует подчеркнуть, что для летательных аппаратов (в том числе беспилотных) при ограниченном объеме топливных баков особую значимость приобретает показатель объемной теплотворной способности и для жидких топлив.

Дата поступления 18.04.23

Применительно к индивидуальным компонентам органических топлив, в термодинамике вместо теплоты сгорания используется термин энтальпии сгорания, которую обычно относят к стандартным условиям – температура 298.15 К (25 °С) и давление 101325 Па (760 мм рт. ст.)^{1,2}. Абсолютные значения данного показателя для товарных топлив в различных литературных источниках существенно различаются, и это в первую очередь связано с различиями в их химическом составе. Например, значение энтальпии сгорания для товарных автомобильных бензинов колеблется от 41 до 46 МДж/кг, то есть различие достигает 12.2%. Есть расхождения значений теплотворной способности и для индивидуальных веществ. В табл. 1 представлены значения теплотворной способности некоторых индивидуальных веществ, газообразных и жидких топлив по различным источникам.

Таблица 1

Теплотворная способность индивидуальных веществ и топлив
(в скобках указаны литературные источники)

Вид топлива	Теплотворная способность, МДж/кг
Водород	119.95 [3]; 119.91 [5]; 120 [6]; 10.8*[7]; 10.8*[8]; 10.79*[11]; 10.78* [13]; 119.95 [14]
Природный газ	48.94-50.15 [6]; 34.10-39.00* [9]
Этилен	47.16 [3]; 47.17 [5]; 60.10* [7]; 59.07* [8]; 59.08* [13]; 47.16 [14]
Пропан	46.33[3]; 46.34 [5]; 91.30*[7]; 91.3*[8]; 93.37* [9]; 90.909* [10]; 93.18*[11]; 46.34 [12]; 91.27* [13]; 46.35 [14]; 92.91* [15]
Сжиженный газ	45.20 [3]
n-Гексан	45.10 [3]; 45.11 [5]; 173.17*[11]; 45.10 [12]
Бензол	40.37 [3]; 40.58 [5]; 140* [8]; 155.67*[11]; 40.58 [12]; 40.14 [14]
Бензин	43.3-44.0 [4]; 41-44 [6]; 43.8 [7]; 43.75 [12];
Керосин	43.0 [7]; 42.96 [12];
Дизельное топливо	43.12 [3]; 42.0-43.0 [6]; 42.4 [7]; 42.62 [12]
Мазут (котельное топливо)	40.0-41.3 [7]; 39.06-41.68 [9]; 39.78-40.61 [12]

* – на единицу объема, МДж/м³

Теплотворная способность углеводородов зависит от их химического (элементного) состава. Согласно основным положениям термодинамики, углеводороды, имеющие одинаковую брутто-формулу, но разные структуры строения, имеют различные энтальпии образования, следовательно, должны различаться и теплоты их сгорания. Между тем, во многих источниках теплоты сгорания изомеров представлены одинаковыми значения-

ми, что явно противоречит вышеуказанным принципам. Авторы¹⁶, исследуя влияние различных факторов на массовую теплотворную способность углеводородов, пришли к выводу, что решающим фактором для этого показателя является отношение числа атомов водорода к числу атомов углерода (m/n), а не наличие в молекулах большого количества малых углеродных циклов, разветвлений углеводородной цепочки. Для экспресс-оценки значений массовой теплотворной способности углеводородов авторы предлагают использовать выражение:

$$\Delta cH^{BH}(C_nH_m) = [m_c \cdot \Delta cH^{BH}(C) + m_n \cdot \Delta cH^{BH}(C)], \quad (1)$$

где $\Delta cH^{BH}(C_nH_m)$ – массовая теплота сгорания, МДж/кг; n и m – число атомов углерода и водорода в молекулах;

m_c, m_n – массы соответствующих атомов в 1 кг (г) углеводорода, то есть $m_c + m_n = 1$ кг (1 г);

$\Delta cH^{BH}(C)$ и $\Delta cH^{BH}(C)$ – доли теплот сгорания, приходящиеся на соответствующие атомы.

Согласно¹⁶, погрешность расчетов составляет около 1%.

На наш взгляд, существенное различие значений теплотворной способности товарных топлив в разных литературных источниках вызвано различным компонентным составом товарных топлив. В частности, компонентный состав бензинов зависит от вида сырья (бензиновых фракций), вовлеченного в процесс переработки нефти.

Известно, что товарные автомобильные бензины готовят путем компаундирования высокооктановых бензиновых фракций ряда процессов переработки нефти и таких специальных компонентов, как риформат, бензин каталитического крекинга, алкилат, изомеризат, оксигенаты (метил-*трет*-бутиловый эфир (МТБЭ), этил-*трет*-бутиловый эфир (ЭТБЭ), этанол) и др.¹⁷. С целью оценки зависимости теплотворной способности товарных автомобильных бензинов от их компонентного состава нами проведены исследования теплотворной способности некоторых высокооктановых компонентов товарных автомобильных бензинов.

Основным высокооктановым компонентом современных автомобильных бензинов для большинства стран является риформат – как правило, продукт химических превращений прямогонных бензиновых фракций. К примеру, в общем балансе автомобильных бензинов США доля риформата составляет порядка 30%, в странах Евросоюза – 40%, а в РФ – 50%¹⁸. Целевым назначением процесса риформинга является повышение октанового числа бензиновых фракций. Если октановое число прямогонных бензиновых фракций обычно

не превышает значения 50–60, то в зависимости от условий проведения процесса октановое число риформата может составить до 90–100 пунктов. Главной причиной повышения октанового числа бензинов при риформинге является превращение основных классов углеводородов (нафтен и парафинов) в ароматические углеводороды.

В процесс риформинга, как правило, вовлекается тяжелая часть бензиновых фракций (85–185 °С), а основным промышленным процессом, позволяющим повысить октановое число легкой части бензинов (фракция НК–85 °С), является процесс изомеризации, в ходе которого основные классы углеводородов превращаются в *изо*-парафины¹⁷.

Очевидно, что на сегодняшний день отсутствует ясная картина, описывающая зависимость теплосодержания моторных топлив от их углеводородного состава, а, значит, не оценены и возможности повышения эффективности их применения с помощью варьирования доли тех или иных компонентов.

Целью настоящей работы стала попытка количественного и качественного анализа влияния наиболее распространенных компонентов автомобильных бензинов на их теплотворную способность.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований на промышленной установке риформинга была отобрана ти-

повая проба стабильного риформата, основные физико-химические свойства, которой представлены в табл. 2.

Таблица 2
Основные физико-химические свойства пробы стабильного риформата

Показатель	Значение
Октановое число по исследовательскому методу	96.7
Октановое число по моторному методу	85.5
Фракционный состав, °С:	
температура начала кипения	36
перегоняется при температуре:	
10%об. бензина	88
50%об. бензина	118
90%об. бензина	156
98%об. бензина	171
температура конца кипения	188
Плотность при 15 °С, кг/м ³	804
Плотность при 20 °С, кг/м ³	802
Давление насыщенных паров, кПа	23.6

Углеводородный состав риформата определялся на хроматографе Shimadzu GC 2010 Plus с капиллярной колонкой (табл 3).

Основные физико-химические свойства типовой пробы изомеризата, отобранной на промышленной установке изомеризации пентан-гексановой фракции, представлены в табл. 4.

Углеводородный состав стабильного изомеризата был определен методом газожидкостной хроматографии на аппарате Хроматэк-Кристалл 5000 (табл. 5).

Таблица 3
Углеводородный состав пробы стабильного риформата

Число атомов углерода	Парафины, % мас.	Олефины, % мас.	Нафтен, % мас.	Ароматика, % мас.	Сумма
C ₄	0.1494	0.0022			0.1516
C ₅	2.6425	0.0569	0.0598		2.7592
C ₆	6.4901	0.1341	0.8561	7.4546	14.9349
C ₇	12.5297	0.3772	0.4129	19.6091	32.9289
C ₈	4.8609	0.0732	0.6538	20.6292	26.2171
C ₉	1.2583	0.0170	0.1048	15.3838	16.7639
C ₁₀	0.2412	0.0037	0.0969	4.9447	5.2865
C ₁₁	0.0341	0.000	0.2221	0.4738	0.7300
C ₁₂	0.0368	0.000	0.0000	0.1895	0.2263
C ₁₃	0.0000	0.0010	0.0000	0.0004	0.0014
Сумма	28.2432	0.6652	2.4065	68.6851	100.0000

Таблица 4
Основные физико-химические свойства пробы изомеризата

Показатель	Значение
Октановое число по исследовательскому методу	96.7
Октановое число по моторному методу	86.3
Фракционный состав, °С:	
температура начала кипения	36
температура конца кипения	64
Плотность при 15 °С, кг/м ³	647
Плотность при 20 °С, кг/м ³	802
Давление насыщенных паров, кПа	95.9

Таблица 5
Углеводородный состав изомеризата

Углеводород	Содержание, % мас.
<i>i</i> C ₄ (изобутан)	0.74
<i>n</i> C ₄ (<i>n</i> -Бутан)	0.60
<i>i</i> C ₅ (изопентан)	32.48
<i>n</i> C ₅ (<i>n</i> -Пентан)	15.54
2,2 ДМБ (2,2-Диметилбутан)	36.32
ЦП (Циклопентан)	2.35
2,3 ДМБ (2,3-Диметилбутан)	4.09
2 МП (2-Метилпентан)	6.33
3 МП (3-Метилпентан)	1.38
<i>n</i> C ₆ (<i>n</i> -Гексан)	0.15
МЦП (Метилциклопентан)	0.02
Сумма	100

Результаты и их обсуждение

Как следует из табл. 3, в риформате преобладают ароматические углеводороды, суммарное их содержание составляет 68.6851%. Среди последних преобладают углеводороды с числом атомов углерода C₈, далее C₇ и C₉ (20.6292, 19.6091, 15.3838 % соответственно). Суммарное содержание данных углеводородов составляет 81% от об-

щего содержания ароматики в риформате. В свою очередь, детальный анализ хроматограмм показывает, что ароматические углеводороды C₈ представлены в основном 1,3-диметилбензолом (8.87%), 1,2-диметилбензолом (5.01%), 1,4-диметилбензолом (3.69%) и этилбензолом (3.19%). Ароматические углеводороды C₉ представлены в основном: 1,2,4-триметилбензолом (5.6%), 1,3-метилэтилбензолом (3.12%), 1,4-метилэтилбензолом (1.41%), 1,3,5-триметилбензолом (1.40%), 1,2,3-триметилбензолом (1.27%) и 1,2-метилэтилбензолом (1.23%).

Из табл. 5, следует, что, в отличие от риформата, изомеризат практически полностью состоит из парафинов. Суммарное содержание парафинов в изомеризате составляет более 97%, в т.ч. содержание парафинов *изо*-строения превышает 80%.

В дальнейшем с целью определения теплосодержания риформата и изомеризата по формуле (1) были рассчитаны значения теплотворной способности каждого компонента и их теплосодержания в смеси. Полученные результаты для риформата приведены в табл. 6, для изомеризата –

Таблица 6

Содержание, теплотворная способность и теплосодержание компонентов риформата

Компонент	Содержание, % мас.	Теплотворная способность, МДж/кг	Количество тепла в смеси, МДж·10 ²
Парафины			
C ₄ H ₁₀	0.1494	45.96	6.86
C ₅ H ₁₂	2.6425	45.23	119.52
C ₆ H ₁₄	6.4901	45.03	292.25
C ₇ H ₁₆	12.5297	44.87	562.21
C ₈ H ₁₈	4.8609	44.76	217.91
C ₉ H ₂₀	1.2583	44.65	56.18
C ₁₀ H ₂₂	0.2412	44.60	10.76
C ₁₁ H ₂₄	0.0341	44.24	1.51
C ₁₂ H ₂₆	0.0368	44.12	1.62
Олефины			
C ₄ H ₈	0.0022	43.67	0.10
C ₅ H ₁₀	0.0569	43.67	2.49
C ₆ H ₁₀	0.1341	43.67	5.86
C ₇ H ₁₄	0.3772	43.67	16.47
C ₈ H ₁₆	0.0732	43.67	3.20
C ₉ H ₁₈	0.0170	43.67	0.74
C ₁₀ H ₂₀	0.0037	43.67	0.16
Нафты			
C ₅ H ₁₀	0.0598	43.67	2.61
C ₆ H ₁₂	0.8561	43.67	63.07
C ₇ H ₁₄	0.4129	43.67	18.03
C ₈ H ₁₆	0.6538	43.67	28.55
C ₉ H ₁₈	0.1048	43.67	4.58
C ₁₀ H ₂₀	0.0969	43.67	4.23
C ₁₁ H ₂₂	0.2221	43.67	9.60
Ароматика			
C ₆ H ₆	7.4558	40.23	299.95
C ₇ H ₈	19.6091	40.77	799.46
C ₈ H ₁₀	20.6292	41.20	849.92
C ₉ H ₁₂	15.3838	41.45	637.66
C ₁₀ H ₁₄	4.9447	41.71	206.24
C ₁₁ H ₁₆	0.4738	41.86	19.83
C ₁₂ H ₁₈	0.1895	42.01	7.96
C ₁₃ H ₂₀	0.0004	42.27	0.02
Сумма	100		4223.59

Содержание, теплотворная способность и теплосодержание компонентов изомеризата

Компонент	Содержание, % мас.	Теплотворная способность, МДж/кг	Количество тепла в смеси, МДж·10 ⁻²
*Парафины			
C ₄ H ₁₀	1.34	45.96	61.59
C ₅ H ₁₂	48.02	45.23	2171.96
C ₆ H ₁₄	48.27	45.03	2173.60
Нафтенy			
C ₅ H ₁₀	2.35	43.67	102.63
C ₆ H ₁₂	0.02	43.67	0.87
Сумма	100		4510.65

* – парафины с одинаковым числом атомов в молекуле объединены в одну строку

в табл. 7. В таблицах также представлено процентное содержание углеводородов в исследуемых компонентах бензина.

Как следует из табл. 6 и 7, теплотворная способность риформата на 6.8% ниже аналогичного показателя изомеризата. Очевидно, что относительно низкое значение теплотворной способности риформата связано с высоким содержанием в нем ароматики, а высокая теплотворная способность изомеризата – с высоким содержанием парафинов. В соответствии с современными экологическими стандартами на автомобильные бензины¹⁷, суммарное содержание в них ароматических углеводородов не должно превышать 35%. Между

тем, и по теплотворной способности риформат нельзя отнести к предпочтительным компонентам товарных бензинов.

Таким образом, анализ теплотворной способности высокооктановых компонентов товарных автомобильных бензинов, таких как риформат и изомеризат, показывает, что исследованные компоненты отличаются по данному показателю примерно на 7%, и, следовательно, содержание риформата как основного источника ароматических углеводородов в товарных бензинах нежелательно не только с точки зрения экологических требований, но и по теплотворной способности топлива.

Литература

1. Карапет'янц М.Х. Химическая термодинамика. – М.: Химия, 1975. – 584 с.
2. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М.: Химия, 1978. – 624 с.
3. ГОСТ 31369-2008 (ИСО 6976:1995) Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. – М.: Стандартинформ, 2009. – С.31-53.
4. Литманович А.А., Новоселова Е.В., Остаева Г.Ю., Паписов И.М., Полякова Е.В. Расчет теплотворной способности топлива. – М.: МАДИ, 2014. – С.7.
5. ГОСТ Р МЭК 62282-3-200-2014. Технологии топливных элементов. Часть 3-200. Стационарные энергоустановки на топливных элементах. Методы испытаний для определения рабочих характеристик. – М.: Стандартинформ, 2015. – С.61, 62.
6. Коломиец П.В. Топливо. – Тольятти: ТГУ, 2011. – 78 с.
7. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Цимбал В.Д. Топливо и процессы горения в теплоэнергетических установках. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. Ч.1. – 148 с.
8. Гришко Б.М., Трубаев П.А. Практикум по расчету горения топлива. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С.12.
9. Назаренко М.Ю., Салтыкова С.Н. Сырьевые материалы в технологии неорганических веществ. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 30, 31, 101.

References

1. Karapet'yants M.Kh. *Khimicheskaya termodinamika* [Chemical thermodynamics]. Moscow, Khimiya Publ., 1975, 584 p.
2. Kireyev V.A. *Kratkiy kurs fizicheskoy khimii* [A short course in physical chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1978, 624 p.
3. GOST 31369-2008 (ISO 6976:1995) *Vychisleniye teploty sgoraniya, plotnosti, otnositel'noy plotnosti i chisla Vobbe na osnove komponentnogo sostava* [Calculation of heat of combustion, density, relative density and Wobbe number based on the component composition]. Moscow, Standartinform Publ., 2009, pp.31-53.
4. Litmanovich A.A., Novoselova E.V., Ostayeva G.Yu., Papisov I.M., Polyakova E.V. *Raschet teplotvornoy sposobnosti topliva* [Calculation of the calorific value of fuel]. Moscow, MADI Publ., 2014, p.7.
5. GOST R MEK 62282-3-200-2014. *Tekhnologii toplivnykh elementov. Chast' 3-200. Statsionarnyye energoustanovki na toplivnykh elementakh. Metody ispytaniy dlya opredeleniya rabochikh kharakteristik* [Fuel cell technologies. Part 3-200. Stationary fuel cell power plants. Test methods for determining performance characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, pp.61, 62.
6. Kolomiyets P.V. *Toplivo* [Fuel]. Tol'yatti, TSU Publ., 2011, 78 p.
7. Belousov V.N., Smorodin S.N., Tsimbal V.D. *Toplivo i protsessy goreniya v teploenergeticheskikh ustanovkakh* [Fuel and combustion processes in thermal power

10. Кафиатуллин Р.А., Сагадеев Е.В., Сагадеев В.В., Сагадеев В.И. Расчет теплоты сгорания углеводородов ряда метана, входящих в энергетические топлива // Архитектурно-строительная экология и санитарная техника. – 2003. – №1. – С.100-101.
11. ГОСТ 22667-82. Газы природные горючие. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. – М.: Стандартинформ, 2006. – 60 с.
12. Карауш С.А. Расчет параметров процессов горения. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – С. 108,117,118.
13. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
14. Земский Г.Т., Простов Е.Н., Зуйков В.А., Ильичев А.В. Теплота сгорания углеводородов состава $C_xH_yO_z$ // Пожарная безопасность. – 2005. – №1. – С.55-93.0
15. Рыбаков Б.А., Буров В.Д., Рыбаков Д.Б. Трушин К.С. Турбины и дизели // Аналитика, обзоры. – 2008. – №3-4. – С.2-8.
16. Кабо Г.Я., Кабо Л.А., Карпушенкова Л.С., Блохин А.В. Энергоемкость углеводородов в жидком и твердом состояниях. Тонкие химические технологии. – 2021. – Т.16, №4. – С.273-286.
17. Капустин В.М. Технология производства автомобильных бензинов. – М.: Химия, 2015. – 256 с.
18. Рахимов М.Н., Лунева М.Э. Компонентный состав высокооктановых автомобильных бензинов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2022. – №4. – С.171-192.
- plants]. St. Petersburg, VShTE SPbGUPTD Publ., 2020, Part 1, 148 p.
8. Grishko B.M., Trubayev P.A. *Praktikum po raschetu goreniiya topliva* [Workshop on calculating fuel combustion]. Belgorod, BSTU Publ., 2020, p.12.
9. Nazarenko M.Yu., Saltykova S.N. *Syr'yevyye materialy v tekhnologii neorganicheskikh veshchestv* [Raw materials in the technology of inorganic substances]. St. Petersburg, St. Petersburg Mining University Publishing House, 2020, pp.30, 31, 101.
10. Kafiatullin R.A., Sagadeyev T.V., Sagadeyev V.V., Sagadeyev V.I. *Raschet teploty sgoraniya uglevodorodov ryada metana, vkhodyashchikh v energeticheskiye topliva* [Calculation of the heat of combustion of methane hydrocarbons included in energy fuels]. *Arkhitekturno-stroitel'naya ekologiya i sanitarnaya tekhnika* [Architectural and Construction Ecology and Sanitary Engineering], 2003, no.1, pp.100-101.
11. *GOST 22667-82. Gazy prirodnyye goryuchiye. Raschetnyy metod opredeleniya teploty sgoraniya, otnositel'noy plotnosti i chisla Vobbe* [Natural gases are flammable. Calculation method for determining the heat of combustion, relative density and Wobbe number]. Moscow, Standartinform Publ., 2006, 60 p.
12. Karaush S.A. *Raschet parametrov protsessov goreniiya* [Calculation of parameters of combustion processes]. Tomsk, Tomsk State Architectural and Construction University Publ., 2015, pp.108,117,118.
13. Roddatis K.F., Poltaretskiy A.N. *Spravochnik po kotel'nykh ustanovkam maloy proizvoditel'nosti* [Handbook on low-capacity boiler plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 488 p.
14. Zemskiy G.T., Prostov Ye.N., Zuykov V.A., Il'ichev A.V. *Teplota sgoraniya uglevodorodov sostava $C_xH_yO_z$* [Heat of combustion of hydrocarbons with the composition $C_xH_yO_z$]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2005, no.1, pp.55-93.
15. Rybakov B.A., Burov V.D., Rybakov D.B. Trushin K.S. *Turbiny i dizeli* [Turbines and diesel engines]. *Analitika, obzory* [Analytics, reviews], 2008, no.3-4, pp.2-8.
16. Kabo G.Ya., Kabo L.A., Karpushenkova L.S., Blokhin A.V. *Energoyemkost' uglevodorodov v zhidkom i tverdom sostoyaniyakh* [Energy intensity of hydrocarbons in liquid and solid states]. *Tonkiye khimicheskiye tekhnologii* [Fine chemical technologies], 2021, vol.16, no.4, pp.273-286.
17. Kapustin V.M. *Tekhnologiya proizvodstva avtomobil'nykh benzinov* [Technology for the production of motor gasoline]. Moscow, Khimiya Publ., 2015, 256 p.
18. Rakhimov M.N., Luneva M.E. *Komponentnyy sostav vysokooktanovykh avtomobil'nykh benzinov* [Component composition of high-octane motor gasoline]. *Setevoye izdaniye «Neftegazovoye delo»* [Oil and Gas Business], 2022, no.4, pp.171-192.