

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-14-20>

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА СМЕШЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ

© Екатерина Борисовна Ковалева¹, Светлана Георгиевна Дьячкова¹,
Анна Александровна Ганина^{2*}, Игорь Евгеньевич Кузора²,
Владимир Анатольевич Сергеев²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.

² АО «Ангарская нефтехимическая компания», Россия, 665830, Иркутская обл., г. Ангарск, а/я 65;

*e-mail: GaninaAA@anhk.rosneft.ru

*Статья поступила 6 марта 2023 г. Поступила после доработки 15 апреля 2023 г.
Принята к публикации 26 апреля 2023 г.*

В настоящее время октановое число для газообразных компонентов определяют расчетным методом на основании углеводородного состава. Это позволяет получить только значение октанового числа исследовательским методом и приводит к расхождению между прогнозируемыми и фактическими значениями октанового числа продукта и, как следствие, к завышенному вложению этих компонентов в топливо, в результате чего снижаются его эксплуатационные характеристики. В связи с этим разработка нового подхода к определению октанового числа смешения низкокипящих компонентов для создания оптимальных рецептур моторных топлив является актуальной задачей. Усовершенствован способ определения октановых чисел смешения (исследовательским и моторным методами) газообразных компонентов автобензинов, отличающийся тем, что за счет предварительной пробоподготовки методом барботирования учтены доли вовлечения фракции углеводородов C₄ и пентан-амиленовой фракции наряду с химической природой компонентов базового топлива. Установлено, что значение октанового числа смешения для газообразных компонентов зависит от углеводородного состава базового компонента. Применение разработанного способа к определению октанового числа смешения газообразных компонентов моторных топлив в условиях компаундирования позволило получить оптимальные рецептуры автомобильных бензинов с вовлечением низкокипящих побочных продуктов и повысить точность прогнозирования состава топлив, улучшив тем самым экономические показатели производства.

Ключевые слова: октановое число смешения; пробоподготовка; газообразные компоненты; автомобильные бензины.

A NEW APPROACH TO DETERMINING THE BLENDING OCTANE NUMBER OF GASEOUS COMPONENTS OF MOTOR GASOLINES

© Ekaterina B. Kovaleva¹, Svetlana G. Dyachkova¹, Anna A. Ganina^{2*},
Igor E. Kuzora², Vladimir A. Sergeev²

¹ Irkutsk National Research Technical University, 83, ul. Lermontova, Irkutsk, 664074, Russia

² JSC "Angarsk Petrochemical Company", POB 65, Angarsk, Irkutsk oblast', 665830, Russia;

*e-mail: GaninaAA@anhk.rosneft.ru

Received March 6, 2023. Revised April 15, 2023. Accepted April 26, 2023.

The octane number for gaseous components (GC) is currently determined using the calculation method proceeding from the hydrocarbon composition. The method provides determination of the research octane number (RON) only. A discrepancy between the actual and predicted values of the octane number thus determined leads to an overestimated introduction of these components into the fuel which results in the reduced fuel performance and economic indicators of the production. In this regard, the development of a new approach to the determination of the blending octane number of low-boiling components is extremely important for designing optimal formulations of motor fuels. A method for determining the blending octane numbers (both RON and MON) of motor gasoline gaseous components has been improved due to preliminary sample preparation by bubbling which provided taking into account the proportion of involving fractions of C₄ hydrocarbon and pentane-amylenes along with the chemical nature of the base fuel components. It is shown that the value of the blending octane number for gaseous components depends on the

hydrocarbon composition of the base component. Application of the developed method to determining the blending octane number of gaseous components of motor fuels allowed us to obtain optimal formulations of gasoline with the involvement of low-boiling by-products and increased the accuracy of forecasting the composition of fuels thus improving the economic performance of the production.

Keywords: blending octane number; sample preparation; gaseous components; motor gasoline.

Введение

В последние годы исследователи уделяют большое внимание проблеме практического использования газообразных побочных продуктов нефтепереработки и нефтехимии, что вызвано ростом производства в этих отраслях промышленности с увеличением количества и расширением номенклатурного ряда низкокипящих компонентов [1].

Одним из направлений применения этих продуктов является вовлечение их в моторные топлива, что позволяет снизить количество дорогостоящих высокооктановых компонентов бензинов [2]. Ранее нами показано, что снижения себестоимости моторных топлив можно достичь, используя в качестве компонентов побочные продукты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств [3, 4]. Вместе с тем применение в компаундировании газообразных компонентов (ГК) имеет ряд ограничений, вызванных невозможностью определения детонационной стойкости для ГК инструментальными методами. Октановое число (ОЧ) — показатель детонационной стойкости — для таких компонентов определяют расчетным путем по углеводородному составу. Так, например, побочный газообразный продукт производства метил-*трет*-бутилового эфира (фракция рафината углеводородов C_4) характеризуется высоким расчетным значением октанового числа по исследовательскому методу (ИОЧ) и низким содержанием серы, но отсутствие значения октанового числа по моторному методу (МОЧ) не позволяет точно определить количество данного продукта при смешении автомобильных бензинов.

Как правило, товарные автомобильные бензины выпускают с запасом качества по основным показателям (в случае единственной нижней границы поля допуска запас по качеству получают, вычитая значения нижней границы поля допуска из результата измерений характеристики качества) [5, 6]. Наименьший запас обычно бывает по детонационной стойкости, мерой которой является октановое число. Октановые числа товарных бензинов либо точно соответствуют установленным требованиям, либо превышают их на десятки доли октановой единицы [7]. Использование при составлении рецептур значений ОЧ для газообразных компонентов, рассчитанных по углеводородному составу, приводит к завышенному

вложению этих компонентов при компаундировании автомобильных бензинов и, как следствие, к ухудшению эксплуатационных характеристик топлива (в первую очередь, давления насыщенных паров — ДНП) и снижению экономических показателей производства (увеличивается запас качества). Попытки оптимизации эксплуатационных характеристик товарной продукции обычно влекут за собой перерасход дорогостоящих компонентов [8–10]. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового подхода к определению октанового числа смешения низкокипящих компонентов для создания оптимальных рецептур моторных топлив.

Экспериментальная часть

Оборудование и хроматографические условия. Исследование состава ГК проводили методом капиллярной газовой хроматографии:

1) по ГОСТ 52714¹ с использованием хроматографа Agilent 6890 на капиллярной колонке НР-1 длиной 100 м с внутренним диаметром 0,25 мм с нанесенной неподвижной фазой (100 % метилсиликон), предколонка — полая капиллярная колонка с внутренним диаметром 0,25 мм и длиной от 1 до 4 м из кварцевого стекла (5 % фенил, 95 % диметилполисилоксан), температуру колонок изменяли со скоростью 5 °С/мин от 5 до 50 °С, затем со скоростью 1,5 °С/мин до 200 °С, температура пламенно-ионизационного детектора составляла 250 °С, газ-носитель — гелий;

2) по ИР 9801² с использованием хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000.2» на капиллярной колонке длиной 50 м и с внутренним диаметром 0,53 мм с пористым слоем из плавленного кварца с нанесенной на него неподвижной фазой — оксидом алюминия, толщина пленки которого составляла 15 мкм, температуру колонок изменяли со скоростью 5 °С/мин от 60 до 140 °С, температура пламенно-ионизационного детектора — 250 °С, газ-носитель — гелий.

¹ ГОСТ 52714–2018. Бензины автомобильные. Определение индивидуального и группового углеводородного состава методом капиллярной газовой хроматографии. — М.: Стандартинформ, 2018. — 7 с.

² ИР 9801. Детальный анализ сырья для селективного гидрирования фракций C_4 и определение содержания 1,3-бутадиена в выходящих потоках методом капиллярной газовой хроматографии.

Углеводородный состав компонентов бензина и топливных композиций определяли методом газовой хроматографии по ГОСТ 32507–2013³ с использованием «Хроматэк-Кристалл 5000.2» на капиллярных колонках длиной 50 м с внутренним диаметром 0,21 мм из кварцевого стекла с привитой метилсиликоновой фазой, толщина пленки которой составляла 0,5 мкм, температуру колонок изменяли со скоростью 2 °С/мин от 35 до 200 °С, температура ПИД — 200 °С, газ-носитель — гелий.

Объекты исследования. Для анализа были выбраны следующие объекты: а) газообразные компоненты (ГК) автобензинов (табл. 1) — фракция рафината углеводородов C₄ производства метил-трет-бутилового эфира (РС₄) и пентан-амиленовая фракция газотракционной установки (ПАФ); б) бензины (топливные композиции), компаундированные с использованием ГК; в) основные компоненты бензинов (БК), доля вовлечения которых (D) в товарный автомобильный неэтилированный бензин $D \geq 20$ % масс. (компоненты 1–4).

Отбор и пробоподготовка образцов. Отбор проб ГК осуществляли в металлические пробоотборные устройства типа ПГО для сжиженных газов⁴. Из пробоотборников ГК вводили методом барботирования в БК или базовые топлива (БТ) в количестве 3,0 % масс. и 8,0 % масс. (минимальное и максимальное вовлечение в топливо, которое обусловлено сохранением эксплуатационных характеристик) при температуре 10 °С. ИОЧ и МОЧ смеси определяли по ГОСТ 8226–2015⁵ и ГОСТ 511–2015⁶.

³ ГОСТ 32507–2013. Бензины автомобильные и жидкие углеводородные смеси. Определение индивидуального и группового углеводородного состава методом капиллярной газовой хроматографии. — М.: Стандартинформ, 2019. — 27 с.

⁴ ГОСТ 14921–2018. Газы углеводородные сжиженные. Методы отбора проб. М.: Стандартинформ, 2018. — 10 с.

⁵ ГОСТ 8226–2015. Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа. — М.: Стандартинформ, 2016. — 30 с.

⁶ ГОСТ 511–2015. Топливо для двигателей. Моторный метод определения октанового числа. — М.: Стандартинформ, 2016. — 41 с.

Обсуждение результатов

В процессе приготовления автомобильных бензинов компаундированием различных компонентов октановые числа смешения (ОЧ_{см}) отличаются от среднего арифметического ОЧ отдельных смешиваемых компонентов [11, 12]. Существуют различные подходы к учету нелинейной корреляции ОЧ индивидуальных и смесевых составляющих. Эти зависимости определяются с различной степенью точности, и поэтому при расчете рецептов смешения возникает неизбежная погрешность прогноза данного показателя [13–15]. В работе [16] описано определение октановых чисел смешения ароматических углеводородов, до наших исследований для низкокипящих нефтепродуктов ОЧ_{см} не определяли.

Для определения октанового числа ГК в условиях компаундирования в топлива мы использовали следующую формулу:

$$\text{ОЧ}_{\text{см}} = \frac{\text{ОЧ}_{\text{БК+ГК}} - \text{ОЧ}_{\text{БК}} \omega_{\text{БК}}}{\omega_{\text{ГК}}},$$

где ОЧ_{см} — октановое число смешения ГК (ИОЧ_{см} или МОЧ_{см}); ОЧ_{БК} — октановое число базового компонента; ОЧ_{БК+ГК} — октановое число смеси базового и газообразного компонентов, определенное по исследовательскому или моторному методу; ω — доля соответствующего компонента. Данная формула позволяет получить более достоверные значения октановых чисел смешения по исследовательскому методу (ИОЧ_{см}) и ранее не определяемые октановые числа смешения по моторному методу (МОЧ_{см}).

Применимость предложенного подхода к составлению точных рецептов топлив была доказана экспериментально при вовлечении ГК в четыре базовых компонента товарных автомобильных бензинов, а также при составлении модельных топливных композиций на основании полученных данных.

В качестве БК были исследованы основные компоненты автобензинов, доля вовлечения которых (D) в товарный бензин $D \geq 20$ % масс.:

БК 1 — легкая фракция бензина каталитического крекинга (НК-130 °С), D (АИ-92-К2) ≥ 60 % масс.;

Таблица 1. Средние значения физико-химических показателей и углеводородного состава ГК

Table 1. Average values of the physicochemical parameters and hydrocarbon composition of GC

ГК	Углеводородный состав, % масс.					Расчетное значение		
	n-Парафины	Изопарафины	Олефины	Нафтенy	Арены	Плотность 15 °С, кг/м ³	ДНП, кПа	ИОЧ _{ГК}
РС ₄	30,1	22,7	50,0	Менее 0,05	Менее 0,05	453,4	597,3	102,3
ПАФ	4,5	44,4	49,9	1,2	0,35	634,1	139,3	96,8

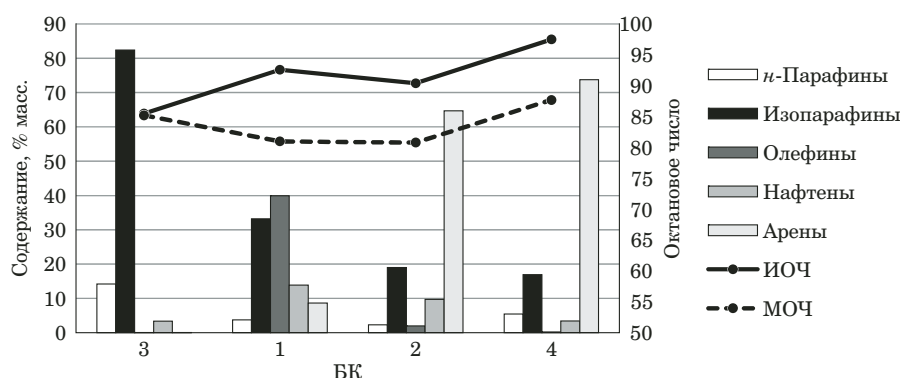


Рис. 1. Углеводородный состав (определен методом ГЖХ) и значения ОЧ базовых компонентов 1 – 4

Fig. 1. The hydrocarbon composition (determined by the gas chromatography method) and the octane numbers of the basic components 1 – 4

БК 2 — тяжелая фракция бензина каталитического крекинга (130 °С-КК), D (АИ-92-К2) ≥ 20 % масс.;

БК 3 — изомеризат легкой прямогонной нефти (Из), D (АИ-92-К5, АИ-95-К5 и АИ-98-К5) ≥ 30 % масс.;

БК 4 — тяжелый риформат прямогонной нефти (ТР), D (АИ-92-К5, АИ-95-К5 и АИ-98-К5) ≥ 50 % масс.

Для базовых компонентов 1 – 4 определили значения ИОЧ, МОЧ и углеводородный состав (табл. 2), который находится в полном соответствии с химией технологических процессов, применяемых для получения БК.

Так, легкая фракция каталитического крекинга содержит олефины, в компоненте с установки риформинга и в тяжелой фракции каталитического крекинга преобладают ароматические углеводороды. В изомеризате (БК 3) содержится большое количество изопарафинов. От химического состава бензинов и их компонентов напрямую зависят такие показатели, как ОЧ и «чувствительность топлива» (разница между МОЧ и ИОЧ). Показано, что наибольшими значениями МОЧ и ИОЧ среди исследуемых базовых компонентов обладает БК 4, содержащий максимальное количество ароматов. С другой стороны, наибольшим значением «чувствительности» обладают непредельные углеводороды, наименьшим — парафиновые. И действительно, высокое содер-

жание изопарафинов в изомеризате (БК 3) дает низкую «чувствительность топлива» (рис. 1).

В каждый компонент бензина в лабораторных условиях методом барботирования вводили 3,0 % масс. ГК и определяли ИОЧ и МОЧ смеси по ГОСТ 8226–2015 и ГОСТ 511–2015. При этом доля БК ($\omega_{БК}$) равна 0,97, а доля ГК ($\omega_{ГК}$) — 0,03.

Показано, что наличие изопарафинов в БК 3 приводит к наибольшему приросту октанового числа при вовлечении ГК. Для БК 2 и 4 наблюдается снижение содержания парафиновых углеводородов, но при этом содержание ароматов увеличивается, что обеспечивает прирост ОЧ смеси. Низкое содержание ароматических и парафиновых углеводородов в легкой фракции каталитического крекинга (БК 1) приводит к снижению ОЧ смеси при вовлечении ГК (табл. 3).

На основании полученных данных по приведенной выше формуле рассчитывали ИОЧ_{см} и МОЧ_{см} для каждого ГК при вовлечении в БК 1 – 4, а также ИОЧ_{ГК} по углеводородному составу. Показано, что ИОЧ_{ГК} одинаковы для всех БК, не позволяют учитывать долю вовлечения ГК ($\omega_{ГК}$) и значительно отличаются от полученных по формуле ИОЧ_{см} и МОЧ_{см} при вовлечении в БК 1 – 4 (рис. 2).

Установлено, что значение ОЧ_{см} для ГК зависит от углеводородного состава базового компонента. Для обеих исследуемых фракций (РС₄, ПАФ) максимальное ИОЧ_{см} наблюдается в БК 3,

Таблица 2. Углеводородный состав БК

Table 2. Hydrocarbon composition of BC

БК	Углеводородный состав, % масс.					ОЧ	
	n-Парафины	Изопарафины	Олефины	Нафтенy	Арены	ИОЧ	МОЧ
1	3,75	33,20	39,94	13,86	8,62	92,6	81,0
2	2,35	18,99	1,95	9,74	64,72	90,4	80,8
3	14,19	82,41	0,04	3,36	Менее 0,05	85,5	85,2
4	5,44	16,96	0,21	3,40	73,74	97,5	87,7

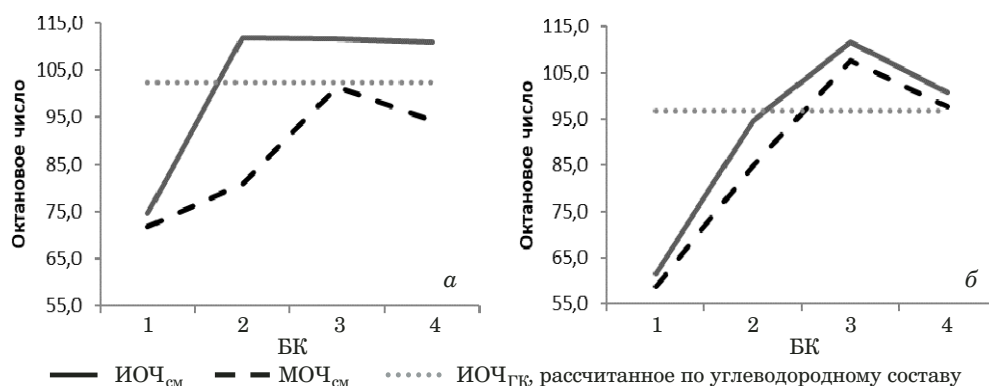


Рис. 2. Октановые числа смешения для ГК, полученные по формуле: а — для RC_4 ; б — для ПАФ

Fig. 2. Blending octane numbers for GC calculated for: a — RC_4 ; b — PAF

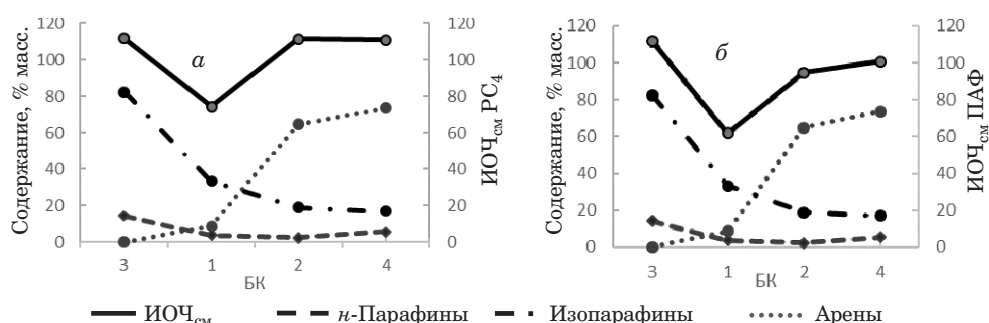


Рис. 3. Октановые числа смешения для ГК, полученные при вовлечении в различные БК: а — для RC_4 ; б — для ПАФ

Fig. 3. Blending octane numbers for GC obtained when involved in various BC: a — RC_4 ; b — PAF

Таблица 3. Значения прироста ИОЧ при вовлечении ГК (RC_4 и ПАФ) в БК различного углеводородного состава

Table 3. The increment of RON when involving GC (RC_4 and PAF) in BC of different hydrocarbon composition

БК	Углеводородный состав, % масс.					ИОЧ БК	ИОЧ БК + RC_4	Прирост ИОЧ ₁	ИОЧ БК + ПАФ	Прирост ИОЧ ₂
	n -Парафины	Изопарафины	Олефины	Нафтенy	Арены					
1	3,75	33,20	39,94	13,86	8,62	92,6	92,2	-0,4	91,9	-0,7
2	2,35	18,99	1,95	9,74	64,72	90,4	90,7	+0,3	90,5	+0,1
3	14,19	82,41	0,04	3,36	Менее 0,05	85,5	86,0	+0,5	86,0	+0,5
4	5,44	16,96	0,21	3,40	73,74	97,5	97,7	+0,2	97,6	+0,1

содержащем изопарафины, с увеличением доли ароматических углеводородов (БК 2, БК 4) $ИОЧ_{см}$ снижается незначительно. Наименьшее $ИОЧ_{см}$ по сравнению с $ИОЧ_{ГК}$ ГК проявляют при вовлечении в БК 1, в составе которого содержание изопарафинов и ароматических углеводородов снижено (для ПАФ ниже на 35,2 ед., для RC_4 — на 27,9 ед.) (рис. 3).

Применение предложенного подхода к определению октанового числа смешения газообразных компонентов моторных топлив показало зависимость $ОЧ_{см}$ ГК от химического состава БК и позволило определить не только значения $ИОЧ_{см}$, но и $МОЧ_{см}$, определение которого для ГК ранее было невозможным.

Для проверки практического применения разработанного подхода были приготовлены модельные топливные композиции, состоящие из компонентов для приготовления автомобильных бензинов марок АИ-92-К5 и АИ-92-К2. В АИ-92-К5 основным компонентом является ТР с преобладанием ароматических углеводородов, а в композицию АИ-92-К2 в большем количестве добавлена фракция НК-130 с высоким содержанием олефинов (табл. 4).

В каждую топливную композицию в лабораторных условиях вводили RC_4 , определяли $ИОЧ$ и $МОЧ$ смеси и рассчитывали $ИОЧ_{см}$ и $МОЧ_{см}$ по предложенной формуле (табл. 5). При этом содержание RC_4 увеличили до максимально возможного (8,0 % масс.), позволяющего обеспечить

Таблица 4. Углеводородный состав модельных топливных композиций**Table 4.** Hydrocarbon composition of model fuel compositions

Композиция	Углеводородный состав, % масс.				
	<i>n</i> -Парафины	Изопарафины	Олефины	Нафтенy	Арены
1	10,11	43,07	1,47	4,46	39,41
2	6,47	27,01	19,89	10,24	35,49

Таблица 5. Значения ОЧ смешения для PC₄**Table 5.** The values of blending octane numbers for PC₄

Топливная композиция	Базовая основа			Смесь			Расчетное значение ОЧ _{см}	
	МОЧ	ИОЧ	ДНП	МОЧ	ИОЧ	ДНП	МОЧ _{см}	ИОЧ _{см}
1 + 8,0 % масс. PC ₄	83,3	91,0	60,0	83,9	92,1	92,3	91,4	106,0
2 + 8,0 % масс. PC ₄	82,6	94,8	39,8	83,0	95,3	77,5	87,9	101,4

Таблица 6. Рецептуры товарных бензинов до и после применения нового подхода определения ОЧ ГК**Table 6.** Comparison of formulations of commercial gasoline before and after application of the new approach to the determination of the blending octane number of GC

Марка	Наименование	Содержание, % масс.	
		При определении ОЧ ГК известным методом	При определении ОЧ ГК предложенным методом
АИ-92-К2	Фракция рафината углеводородов C ₄	6,01	8,08
	МТБЭ	0,31	0
	Тяжелый риформат	22,79	29,6
	Смесь фракции НК-130 и пентан-амиленовой фракции	54,45	49,73
	Фракция 130 °С-КК	16,44	12,56
	МОЧ/ИОЧ _{расчет}	83,0/94,9	83,0/94,5
	МОЧ/ИОЧ _{факт}	82,5/94,2	83,0/94,2
АИ-92-К5	Фракция рафината углеводородов C ₄	4,45	6,67
	Тяжелый риформат	48,16	52,18
	Гексановая фракция	7,53	10,57
	Изомеризат	29,79	22,71
	Защелоченная фракция 130 °С-КК	8,53	5,59
	МТБЭ	1,54	2,28
	МОЧ/ИОЧ _{расчет}	85,5/92,1	84,3/92,1
	МОЧ/ИОЧ _{факт}	84,9/92,5	84,2/92,3

Примечание. Расчет рецептур выполнен с использованием программы Aspen PIMS (Process Industry Modeling System). Available at: <https://www.aspentech.com/en/resources/brochure/aspen-pims-family> (accessed April 14, 2019).

нормативные требования по показателю ДНП в зимний период (не более 100 кПа). Установлено, что ИОЧ_{см}/МОЧ_{см} PC₄ для топливной композиции АИ-92-К5 составило 106,0/91,4, для АИ-92-К2 — 101,4/87,9.

Использование полученных значений ИОЧ_{см}/МОЧ_{см} для фракции рафината углеводородов C₄ с помощью разработанного подхода позволило получить оптимальные рецептуры автомобильных бензинов. В составе топлива марки АИ-92-К2 исключен дорогостоящий высокооктановый компонент МТБЭ, для АИ-92-К5 по пока-

зателю МОЧ запас качества снижен на 1,3 (от нормируемого значения не менее 83,0) (табл. 6).

Заключение

Применение разработанного способа к определению октанового числа смешения газообразных компонентов моторных топлив в условиях компаундирования позволило получить оптимальные рецептуры автомобильных бензинов с вовлечением низкокипящих побочных продуктов нефтепереработки и повысить точность прогно-

зирования состава топлив, тем самым улучшив экономические показатели производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdellatief T. M. M., Ershov M. A., Kapustin V. M. New Recipes for Producing a High-Octane Gasoline Based on Naphtha from Natural Gas Condensate / Fuel. 2020. Vol. 276. 118075. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118075
2. Капустин В. М. Технология производства автомобильных бензинов. — М.: Химия, 2015. — 256 с.
3. Ганина А. А., Кузора И. Е., Дьячкова С. Г. и др. Использование побочных потоков товарного производства нефтепродуктов / Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3. С. 536 – 546. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-536-546
4. Ганина А. А., Дьячкова С. Г., Деркач Д. С. Разработка способа подготовки побочного продукта производства бутановых спиртов для использования в качестве компонента моторных топлив / Сб. тезисов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов». Иркутск, 26 – 27 апреля 2018 г. С. 147.
5. ГОСТ Р ИСО 3951-5-2009. Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по количественному признаку. Часть 5. — М.: Стандартиформ, 2010. — 43 с.
6. Денисов К. Ю. Проблема запаса качества и прогнозирования октанового числа при компаундировании товарных бензинов / Нефтегазопереработка. Материалы международной научно-практической конференции. 2016. С. 44 – 45.
7. Гуреев А. А., Азев В. С. Автомобильные бензины. Свойства и применение: уч. пособие для вузов. — М.: Нефть и газ, 1996. — 444 с.
8. Цодиков Ю. М. Эффективность применения метода последовательного линейного программирования для решения задач планирования производства на нефтеперерабатывающем заводе / Проблемы управления. 2018. № 6. С. 55 – 66.
9. Бабкин К. Д., Макаров А. Д. Разработка математической модели для определения антидетонационных свойств бензинов с кислородсодержащими октаноповышающими добавками / Мир нефтепродуктов. Вест. нефтяных компаний. 2019. № 5. С. 9 – 15.
10. Петухов М. Ю., Боронин А. Б., Хохлов А. С. Подходы к ЛПИ-моделированию производства НПЗ для целей планирования / Автоматизация в промышленности. 2016. № 2. С. 22 – 28.
11. Ershov M. A., Potanin D. A., Tarazanov S. V., et al. Blending Characteristics of Isooctene, MTBE and TAME as Gasoline Components / Energy Fuels. 2020. Vol. 34. N 3. P. 2816 – 2823. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b03914
12. Иванчина Э. Д., Ивашкина Е. Н., Храпов Д. В. и др. Интенсификация процессов производства бензинов различных марок на основе учета межмолекулярных взаимодействий компонентов смеси и состава перерабатываемого сырья / Химия и технология топлив и масел. 2017. № 2. С. 24 – 32. DOI: 10.1007/s10553-017-0794-6
13. Николайчук Е., Сратиев В., Шишкова И. и др. Исследование соответствия измеренных и прогнозируемых программой RPMS октановых чисел бензиновых смесей, соответствующих стандарту ЕВРО V / Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2017. № 1. С. 3 – 6.
14. Wen Yu. America Morales Gasoline Blending System Modeling via Static and Dynamic Neural Networks / Int. J. Modell. Simul. 2004. Vol. 24. N 3. P. 151 – 160. DOI: 10.2316/Journal.205.2004.3.205 – 4142
15. Горбунов С. С., Алексанян А. А., Костандян В. А., Егоров А. Ф. Учет нелинейности рецептур смешения топлив в программном комплексе оптимального планирования и оптимизации рецептур смешения топлив / Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2019. № 2. С. 9 – 12.
16. Ахметов А. Ф., Гайсина А. Р., Ганцев А. В., Ганцев Д. В. Октановое число смешения ароматических углеводородов в товарных бензинах / Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9. № 3. С. 105 – 107.

REFERENCES

1. Abdellatief T. M. M., Ershov M. A., Kapustin V. M. New Recipes for Producing a High-Octane Gasoline Based on Naphtha from Natural Gas Condensate / Fuel. 2020. Vol. 276. 118075. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118075
2. Kapustin V. M. Technology for the production of automobile gasolines. — Moscow: Khimiya, 2015. — 256 p. [in Russian].
3. Ganina A. A., Kuzora I. E., D'yachkova S. G., et al. Use of side-streams of commercial production of petroleum products / Izv. Vuzov. Prikl. Khim. Biotekhnol. 2019. Vol. 9. N 3. P. 536 – 546 [in Russian]. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-536-546
4. Ganina A. A., D'yachkova S. G., Derkach D. S. Development of a method for preparing a by product of butyl alcohol production for use as a component of motor fuels / Proc. of the XIII all-Russian scientific and practical conference with international participation "Prospects for the development of technology for processing hydrocarbon and mineral resources", Irkutsk. April 26 – 27, 2018. P. 147 [in Russian].
5. GOST R ISO 3951-5-2009. Statistical methods. Procedures for selective control on a quantitative basis. Part 5. — Moscow: Standartinform, 2010. — 43 p. [in Russian].
6. Denisov K. Yu. The problem of quality margin and prediction of octane number in the compounding of commercial gasoline / Neftgazopererabotka. Materials of the international scientific-practical conference. 2016. P. 44 – 45 [in Russian].
7. Gureev A. A., Azev V. S. Automobile gasolines. Properties and application: Textbook for universities. — Moscow: Neft' i Gaz, 1996. — 444 p. [in Russian].
8. Tsodikov Yu. M. Efficiency of applying the method of sequential linear programming to solve problems of production planning at an oil refinery / Probl. Upravl. 2018. N 6. P. 55 – 66 [in Russian].
9. Babkin K. D., Makarov A. D. Development of a mathematical model for determining the anti-knock properties of gasolines with oxygen-containing octane-boosting additives / Mir Neftprod. Vestn. Neft. Komp. 2019. N 5. P. 9 – 15 [in Russian].
10. Petukhov M. Yu., Boronin A. B., Khokhlov A. S. Approaches to LP-modeling of refinery production for planning purposes / Avtomatiz. Prom. 2016. N 2. P. 22 – 28 [in Russian].
11. Ershov M. A., Potanin D. A., Tarazanov S. V., et al. Blending Characteristics of Isooctene, MTBE and TAME as Gasoline Components / Energy Fuels. 2020. Vol. 34. N 3. P. 2816 – 2823. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b03914
12. Ivanchina E. D., Ivashkina E. N., Khrapov D. V., et al. Enhanced production of various grades of gasoline based on studies of intermolecular interactions of blend components and the composition of the processed feedstock / Khim. Tekhnol. Topliv Masel. 2017. Vol. 53. N 2. P. 181 – 196 [in Russian]. DOI: 10.1007/s10553-017-0794-6
13. Nikolaychuk E., Sratiev V., Shishkova I., et al. Investigation of the correspondence between the measured and predicted by the RPMS program octane numbers of gasoline mixtures corresponding to the EURO V standard / Neftepererab. Neftekhim. Nauch. Tekhn. Dostizh. Pered. Opyt. 2017. N 1. P. 3 – 6 [in Russian].
14. Wen Yu. America Morales Gasoline Blending System Modeling via Static and Dynamic Neural Networks / Int. J. Modell. Simul. 2004. Vol. 24. N 3. P. 151 – 160. DOI: 10.2316/Journal.205.2004.3.205 – 4142
15. Gorbunov S. S., Aleksanyan A. A., Kostandyan V. A., Egorov A. F. Accounting for the nonlinearity of fuel mixing recipes in the software package for optimal planning and optimization of fuel mixing recipes / Neftepererab. Neftekhim. Nauch. Tekhn. Dostizh. Opyt. 2019. N 2. P. 9 – 12 [in Russian].
16. Akhmetov A. F., Gaisina A. R., Gantsev A. V., Gantsev D. V. Octane number of mixing of aromatic hydrocarbons in commercial gasolines / Neftgaz. Delo. 2011. Vol. 9. N 3. P. 95 – 97 [in Russian].