УДК 665.6

DOI: 10.15372/KhUR2024530

EDN: HLSLKY

Оптимизация технологии каталитического риформинга с целью получения бензина марки АИ-100-К5

Е. Б. КОВАЛЕВА[1], С. Г. ДЬЯЧКОВА[1], А. А. ГАНИНА[2], Ж. Н. АРТЕМЬЕВА[2], И. Е. КУЗОРА[2], Т. Н. ГЕРШПИГЕЛЬ[2], М. В. КОВАЛЕНКО[2]

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск (Россия)

E-mail: K0valevaEB@yandex.ru

[2]АО "Ангарская нефтехимическая компания", Ангарск (Россия)

(Поступила 02.03.2023; после доработки 21.06.2023)

Аннотация

Проведены подбор и оптимизация технологических параметров процесса риформинга, заключающиеся в повышении температуры на входе в реакторы и увеличении отбора бензолсодержащей фракции при фракционировании катализата, что позволило получить фракцию (100–200 °С) – тяжелый риформат требуемого качества по октановому числу 99.5/89.5 (исследовательский/моторный метод соответственно) и использовать его в качестве высокооктанового компонента при производстве бензина АИ-100-К5. На основании данных математического моделирования, требований по минимизации энергозатрат, а также норм по содержанию ароматических углеводородов в товарных автомобильных бензинах было предложено повысить температуру сырья на 1 °С на входе в реакторы блока риформинга. Предложена формализованная схема превращений углеводородов сырья риформинга при повышении температуры процесса, объясняющая качественные и количественные изменения во фракционном составе катализата. Установлено, что увеличение отбора бензолсодержащей фракции позволяет снизить выход легкого риформата, повысить значение октанового числа и снизить массовую долю бензола до 1.5 мас. % в тяжелом риформате. С помощью программного пакета Aspen PIMS program смоделирован оптимальный состав бензина АИ-100-К5, включающий изомеризат легкой прямогонной нафты, рафинат фракции углеводородов C_4, компонент бензиновый высокооктановый (алкилат), метил-*трет*-бутиловый эфир и тяжелый риформат, полученный в условиях оптимизированной схемы. Качество наработанной опытно-промышленной партии (ОПП) топлива полностью отвечает требованиям ТР ТС 013/2011, СТО 44905015-005-2017 и нормам, установленным для эксплуатационных свойств бензина АИ-100-К5, определяемых квалификационными методами и моторно-стендовыми испытаниями. Наработанная ОПП автомобильного бензина АИ-100-К5 обладает улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками, поскольку уменьшено содержание серы до 8.0 мг/кг, бензола до 0.38 об. % и объемной доли ароматических и олефиновых углеводородов до 28.6 и 4.2 об. % соответственно. В результате моторно-стендовых испытаний установлено, что бензин АИ-100-К5 обладает пониженной склонностью к образованию отложений на впускных клапанах и нагара в камере сгорания двигателя.

Ключевые слова: высокооктановый автомобильный бензин АИ-100-К5, оптимизация технологии риформинга, тяжелый риформат, эксплуатационные характеристики бензина, квалификационные испытания

© Ковалева Е. Б., Дьячкова С. Г., Ганина А. А., Артемьева Ж. Н., Кузора И. Е., Гершпигель Т. Н., Коваленко М. В., 2024

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возможность расширения сырьевой базы и оптимизации состава моторных топлив с целью получения высокооктановых автомобильных бензинов привлекает особое внимание исследователей, технологов и автопроизводителей, так как позволяет найти компромисс между снижением расхода топлива, сокращением вредных выбросов в атмосферу и сохранением мощности двигателей [1–6]. Совсем недавно на рынке появился более экологичный и обладающий улучшенным составом бензин марки АИ-100-К5. Автомобильный бензин АИ-100-К5 – высокооктановое топливо, предназначенное для применения в высокофорсированных двигателях прямого впрыска, а также в двигателях, предусматривающих использование бензина с октановым числом выше 95. Применение бензина АИ-100-К5 способствует увеличению мощности двигателя, повышению динамики разгона, снижению уровня вибрации и шума. Дополнительным преимуществом является легкий пуск двигателя автомобиля при низких температурах. Высокие экологические характеристики топлива обусловлены использованием компонентов с низким содержанием серы, бензола и олефинов. Вместе с тем применение используемых в настоящее время высокооктановых компонентов для получения бензина АИ-100-К5 не всегда позволяет достичь требуемых эксплуатационных показателей топлива. В этой связи оптимизация технологии каталитического риформинга, улучшение химмотологических характеристик высокооктановых компонентов, разработка и совершенствование рецептур автомобильного бензина марки АИ-100-К5 на базе доступного отечественного сырья представляют собой важную технологическую задачу, решение которой обеспечит устойчивость рынка моторных топлив в условиях импортозамещения.

Цель настоящей работы – совершенствование рецептуры автомобильного бензина марки АИ-100-К5 при вовлечении высокооктанового тяжелого риформата, полученного за счет оптимизации технологии каталитического риформинга.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оценка качественных, эксплуатационных характеристик топливных композиций проводилась согласно государственным стандартам с применением стандартизированных методик, испытательного оборудования и средств измерений, указанных в ГОСТ 32513- 2013 [7].

Октановое число исследовательским методом (ИОЧ) определяли по ГОСТ 8226-2015 [8], моторным методом (МОЧ) – по ГОСТ 511-2015 [9]. В качестве стандартного одноцилиндрового двигателя использовали установки отечественного производства типа УИТ-85.

Отбор проб нефтепродуктов осуществляли согласно требованиям ГОСТ 14921-78 [10] и ГОСТ 2517-2012 [11].

Объекты настоящего исследования: установка каталитического риформинга, блок-схема которой представлена на рис. 1, тяжелый риформат, изомеризат легкой прямогонной нафты, фракция рафината углеводородов C_4 ($РС_4$) производства метил-*трет*-бутилового эфира, компонент бензиновый высокооктановый (алкилат), метил-*трет*-бутиловый эфир (МТБЭ). Для компонентов автобензина экспериментально определены октановые числа по исследовательскому и моторному методу (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработка оптимального состава автомобильного бензина марки АИ-100-К5 осуществлена на базе доступного отечественного сырья. В качестве компонентов предложено использовать тяжелый риформат, изомеризат легкой прямогонной нафты, фракцию $РС_4$, компонент бензиновый высокооктановый (алкилат) и оксигенатную добавку (МТБЭ), которые при компаундировании в автомобильные бензины АИ-95-К5, АИ-98-К5 обеспечивают соответствие топлива нормативным требованиям. С помощью программного пакета Aspen PIMS program (Process Industry Modeling System)* [12] был смоделирован оптимальный состав автомобильного бензина АИ-100-К5, включающий данные компоненты, с оптимизацией их детонационной стойкости (см. табл. 1). На основании расчетных данных был приготовлен лабораторный образец автомо-

* PIMS – экономико-технологическая система моделирования нефтепереработки – инструмент построения методом линейного программирования моделей планирования процессов нефтепереработки для создания оптимальных планов, включая оценку альтернатив сырой нефти, промежуточного сырья, сырья, получаемого за границами рассматриваемой установки, технологий, продуктов и рынков.

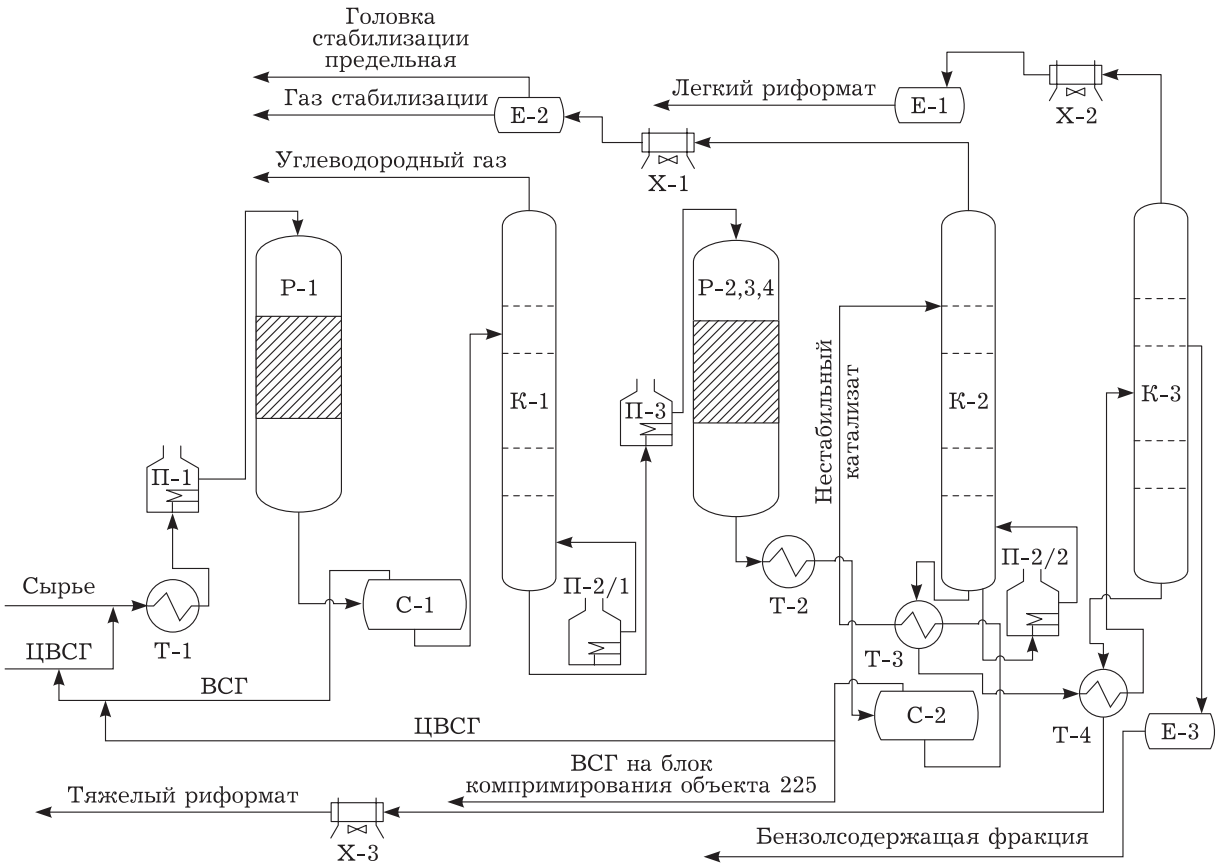

Рис. 1. Блок-схема установки каталитического риформинга. (Т-1)–(Т-4) – теплообменники; (П-1)–(П-3) – печи; С-1, С-2 – сепараторы; (Е-1)–(Е-3) – емкости; (Х-1)–(Х-3) – аппараты воздушного охлаждения/холодильники; Р-1 – реактор гидроочистки; К-1 – стабилизационная колонна нестабильного гидрогенизата; (Р-2)–(Р-4) – реакторы риформинга; К-2 – стабилизационная колонна нестабильного катализата с выделением легких углеводородов; К-3 – ректификационная колонна для разделения стабильного катализата на три фракции: легкий риформат, бензолсодержащая фракция, тяжелый риформат.

бильного бензина АИ-100-К5. Установлено, что при вовлечении расчетного количества предлагаемых нами компонентов в автомобильные бензины марки АИ-100-К5 для достижения нормативных показателей требуется не только оптимизация компонентного состава топлива, но и улучшение некоторых характеристик компонентов, основная из которых – детонационная стойкость. Так, согласно расчетам, тяжелый риформат, вовлекаемый в высокооктановый автобензин, должен иметь показатель “Октановое число” (ИОЧ/МОЧ), равный 99.5/89.5. Вместе с тем фактически вовлекаемый тяжелый риформат имеет более низкие значения – 97.2/87.1.

ТАБЛИЦА 1

Компонентный состав автомобильного бензина марки АИ-100-К5, октановое число топлива и его компонентов

Компонент	Массовая доля компонента, мас. %	Октановое число (ИОЧ/МОЧ)	
		Эксперимент	Расчет
Тяжелый риформат	36.3	97.2/87.1	99.5/89.5
Изомеризат легкой прямогонной нафты	3.6	85.4/79.7	86.4/80.4
Рафинат фракции углеводородов C_4	4.5	105.2/90.1	106.0/91.0
Компонент бензиновый высокооктановый (алкилат)	40.5	97.1/93.5	96.4/92.7
Метил-*трет*-бутиловый эфир	15.1	115.0/95.1	116/96
Автомобильный бензин АИ-100-К5		99.7/89.8	100.6/90.8

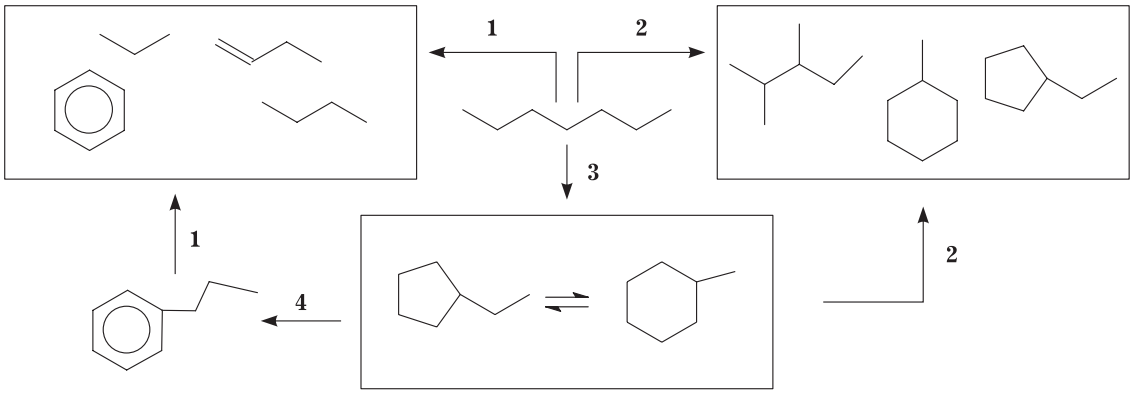

Рис. 2. Формализованная схема превращений углеводородов в процессе риформинга.

Экспериментально найденный показатель детонационной стойкости для оставшихся из предложенных нами компонентов хорошо коррелирует с расчетным (см. табл. 1).

Нами предложено скорректировать характеристики тяжелого риформата, в частности, повысить его детонационную стойкость, за счет оптимизации технологического режима процесса каталитического риформинга (см. рис. 1).

Известно, что повышение температуры риформинга приводит к интенсификации реакций крекинга и дегидрирования. Превращения углеводородов сырья риформинга, происходящие при повышении температуры процесса, наглядно демонстрирует формализованная схема (рис. 2). С увеличением температуры процесса риформинга преимущественно протекают реакции дегидроциклизации алканов (направление **3**), изомеризации алифатических и циклических алканов (направление **2**) и дегидрирования циклогексанов (направление **4**), что приводит к образованию ароматических углеводородов, и, как следствие, повышается октановое число катализата. Гидрогенолиз и гидрокрекинг алифатических и замещенных ароматических углеводородов приводит к образованию бензола, легкокипящих и газообразных продуктов (направление **1**). Тяжелые ароматические углеводороды формируют высококипящую фракцию катализата, в то время как низкокипящая фракция будет обогащаться легкими и газообразными алканами.

Суммарный тепловой эффект реакций риформинга складывается из эндотермического эффекта реакций ароматизации и экзотермического эффекта реакций гидрокрекинга. Следовательно, увеличение температуры в реакторах риформинга позволит повысить степень ароматичности катализата и, как следствие, октановое число тяжелого риформата. Но при этом реакция гидрокрекинга приведет к образованию низших газообразных алканов.

По этой причине первым шагом к увеличению детонационной стойкости тяжелого риформата – одного из основных компонентов автомобильного бензина АИ-100-К5, стало повышение температуры на входе в реакторы риформинга. С помощью программного обеспечения Aspen Hysys на базе инженерной модели установки каталитического риформинга были проведены расчетные исследования. Определена зависимость отборов продуктов блока риформинга и их качественных показателей от температуры на входе в реакторы риформинга в диапазоне от 480 до 500 °С (рис. 3). Установлено, что с повышением температуры процесса выход тяжелого риформата снижается (см. рис. 3, *а*, кривая *1*), а отбор легкого риформата увеличивается (см. рис. 3, *а*, кривая *3*). При этом возрастает массовая доля ароматических углеводородов (в том числе бензола) в тяжелом риформате (см. рис. 3, *а*, кривая *2*), и, как следствие, увеличивается его октановое число (см. рис. 3, *а*, кривые *4*, *5*).

Исследования в интервале температур входа в реакторы 480–500 °С позволили определить оптимальные условия процесса. Показатели качества тяжелого риформата:

– при температуре 482 °С: ИОЧ – 97.4, МОЧ – 86.8, массовая доля ароматических углеводородов – 71.7 %, отбор тяжелого риформата – 71.12 %;

– при температуре 483 °С: ИОЧ – 97.8, МОЧ – 87.1, массовая доля ароматических углеводородов – 72.3 %, отбор тяжелого риформата – 70.82 %;

– при температуре 484 °С: ИОЧ – 98.2, МОЧ – 87.4, массовая доля ароматических углеводородов – 73.0 %, отбор тяжелого риформата – 70.51 %.

Из полученных данных следует, что увеличение температуры на 1 °С (с 482 до 483 °С)

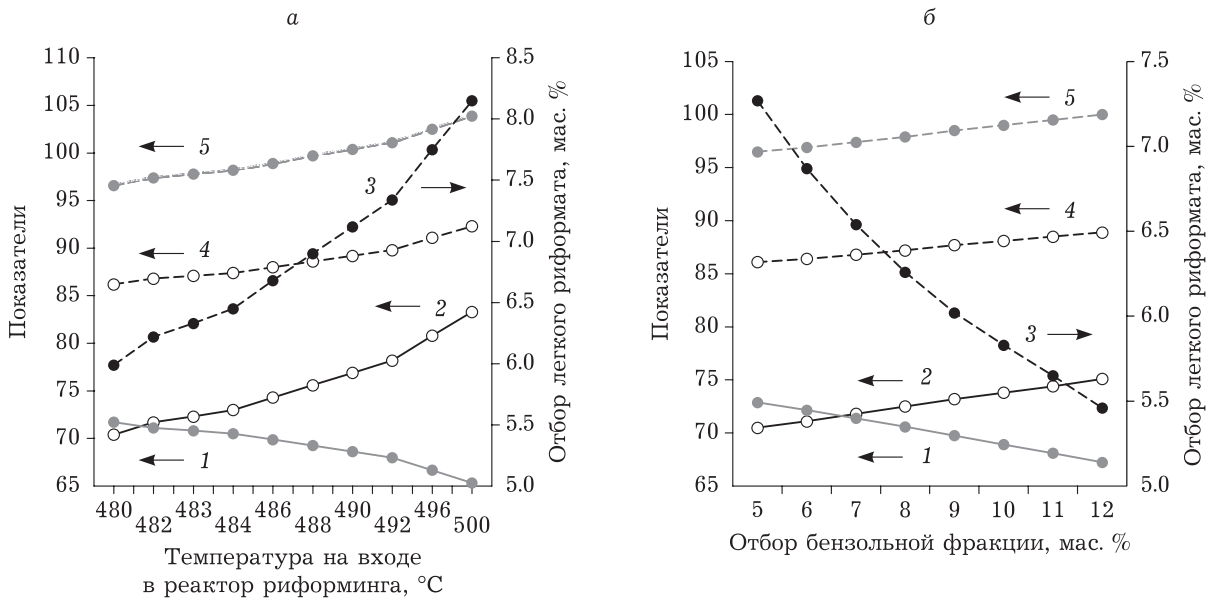

Рис. 3. Зависимость отборов продуктов блока риформинга и их качественных показателей от температуры на входе в реакторы риформинга (*а*) и от изменения отбора бензольной фракции (*б*): *1* – отбор тяжелого риформата, мас. %; *2* – массовая доля ароматических углеводородов в тяжелом риформате, мас. %; *3* – отбор легкого риформата, мас. %; *4* – МОЧ тяжелого риформата; *5* – ИОЧ тяжелого риформата. ИОЧ, МОЧ – октановые числа, определенные исследовательским и моторным методами соответственно.

позволяет повысить октановое число тяжелого риформата на 0.4 ед. Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению массовой доли ароматических углеводородов, что чревато несоответствием по качеству АИ-100. Без корректировки режима риформинга по температуре добиться значений октанового числа тяжелого риформата требуемого качества невозможно. Для регулирования температуры используются приборы учета с погрешностью измерения 0.5 °С.

На основании данных расчетов, требований по минимизации энергозатрат, а также норм по содержанию ароматических углеводородов в товарных бензинах (≤35.0 об. %, ГОСТ 32513-2013 [7]) предложено повысить температуру сырья на входе в реакторы блока риформинга на 1 °С (с 482 до 483 °С).

Согласно существующей технологической схеме (см. рис. 1), выходящая из реактора (Р-4) газопродуктовая смесь охлаждается в теплообменнике (Т-2) и поступает в сепаратор высокого давления (С-2), где происходит ее разделение на водородсодержащий газ (ВСГ) и нестабильный катализат, который поступает в стабилизационную колонну (К-2) для удаления легких углеводородов. Стабильный катализат из нижней части колонны (К-2) после последовательного охлаждения в теплообменнике (Т-3) и нагрева в теплообменнике (Т-4) подается в ректификационную колонну (К-3) для разделения на три фракции с фактическими пределами выкипания: легкий риформат (34–73 °С), бензолсодержащая фракция (58–95 °С), тяжелый риформат (97–201 °С).

На основании данных математического моделирования процесса риформинга определена зависимость отборов продуктов блока риформинга и их качественных показателей от температуры на входе в реакторы риформинга в диапазоне от 480 до 500 °С (см. рис. 3). Показано, что повышение температуры на входе в реакторы риформинга (с 480 до 500 °С) приводит к увеличению суммарного отбора легкого риформата и бензолсодержащей фракции, а также к повышению массовой доли ароматических углеводородов (в том числе бензола) в тяжелом риформате. При температуре на входе в реакторах риформинга 500 °С массовая доля бензола увеличивается до 1.8 %, снизить содержание бензола в тяжелом риформате возможно за счет увеличения отбора бензолсодержащей фракции [13]. Нами определена зависимость выхода продуктов риформинга и их качественных показателей от отбора бензолсодержащей фракции в диапазоне от 5 до 12 мас. % (см. рис. 3, *б*). Установлено, что увеличение отбора бензолсодержащей фракции позволяет снизить выход легкого риформата (см. рис. 3, *б*, кривая *3*), повысить значение октанового числа (см. рис. 3, *б*, кривые *4*, *5*) и снизить массовую долю бензола

ТАБЛИЦА 2

Показатели качества опытно-промышленной партии автомобильного бензина АИ-100-К5

Показатель	Норма		Результат испытаний	Метод испытания
	ТР ТС 013/2011	СТО 44905015-005-2017	АИ-100-К5	
Октановое число по исследовательскому методу, не менее	80.0	100.0	100.7	ГОСТ 8226
Октановое число по моторному методу, не менее	76.0	90.0	90.0	ГОСТ 511
Концентрация:				
свинца, мг/дм^3	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ EN 237
железа, мг/кг	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 32514
марганца, мг/кг	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ Р 51925
Плотность при 15 °С, кг/м^3	–	725.0–775.0	737.1	ГОСТ ISO 12185
Массовая доля серы, мг/кг, не более	10	10.0	8.0	ГОСТ ISO 20884
Индукционный период, мин, не менее	–	600	600	ГОСТ 4039
Концентрация смол, промытых растворителем, мг/дм^3 (мг на 100 см^3) бензина, не более	–	50 (5)	8 (1)	ГОСТ 1567
Коррозия медной пластинки (3 ч при 50 °С), ед. по шкале	–	класс 1	класс 1	ГОСТ 6321
Внешний вид	–	Чистый, прозрачный	Чистый, прозрачный	п. 8.2 СТО 44905015-005
Объемная доля бензола, %, не более	1	1.0	0.38	ГОСТ 32507
Массовая доля кислорода, %, не более	2.7	2.7	2.44	ГОСТ EN 13132
Объемная доля углеводородов, %, не более:				
олефиновых	18	18.0	4.2	ГОСТ 32507
ароматических	35	35.0	28.6	ГОСТ 32507
Объемная доля оксигенатов, %, не более:				
Метанол	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ EN 13132
Этанол	5	5.0	Менее 0.17	ГОСТ EN 13132
Изопропиловый спирт	10	10.0	Менее 0.17	ГОСТ EN 13132
Изобутиловый спирт	10	10.0	Менее 0.17	ГОСТ EN 13132
Трет-бутиловый спирт	7	7.0	Менее 0.17	ГОСТ EN 13132
Эфиры (С5 и выше)	15	15.0	13.4	ГОСТ EN 13132
Другие оксигенаты (с температурой конца кипения не выше 210 °С)	10	10.0	Менее 0.17	ГОСТ EN 13132
Объемная доля монометиланилина, %	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 32515
Содержание водорастворимых кислот и щелочей (pH)	–	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 6307
Кислотность, мг KOH на 100 см^3 топлива, не более	–	0.80	0.05	ГОСТ 5985
Давление насыщенных паров (ДПН), кПа	35–100 (80)	35.0–100.0(80)	75.0	ГОСТ 1756
Фракционный состав:				
Объемная доля испарившегося бензина, % при температуре:				
70 °С (И70)	–	15.0–50.0	24.0	ГОСТ 2177 (метод А)
100 °С (И100)	–	40.0–70.0	46.5	ГОСТ 2177 (метод А)
150 °С (И150), не менее	–	75.0	90.5	ГОСТ 2177 (метод А)
Конец кипения, °С, не выше	–	215.0	193.5	ГОСТ 2177 (метод А)
Остаток в колбе, % (по объему), не более	–	1.5	1.0	ГОСТ 2177 (метод А)
Максимальный индекс паровой пробки (ИПП) (10ДНП+7(И70))	–	Не нормируется[a]	918	п. 8.3 СТО 44905015-005
Класс испаряемости бензина: A, B, C и C1, D и D1, E и E1, F и F1	–	–	F	

[a] Для бензинов классов A, B, C, D, E и F индекс паровой пробки не нормируется.

ТАБЛИЦА 3

Результаты квалификационных испытаний опытно-промышленной партии автомобильного бензина марки АИ-100-К5

Показатель	Норма	Результат испытаний	Метод испытания
Содержание механических примесей, мас. %, не более	0.005	0.00001	ГОСТ 10577
Фазовая стабильность – температура помутнения, °С, не выше, для бензинов, применяемых при температуре:			
не ниже 0 °С	–5	ниже –60	ГОСТ 5066
ниже 0 °С	–25	ниже –60	ГОСТ 5066
Концентрация фактических смол (непромытых растворителем), мг/100 см^3 бензина, не более	30	1	ГОСТ 1567
Химическая стабильность: сумма продуктов окисления, мг/100 см^3 бензина, не более	100	8	ГОСТ 22054
Окислительная стабильность: концентрация потенциальных смол, мг на 100 см^3 бензина, не более	30	2	ГОСТ 33300
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие	Отсутствие	ГОСТ 6307
Кислотность, мг КОН на 100 см^3 бензина, не более	0.8	Отсутствие	ГОСТ 5985
Коррозионная активность и защитные свойства, баллы:			
в присутствии 30 мл дистиллированной воды	–	3/3[a]	СТО 11605031-006
в присутствии 0.1 мл дистиллированной воды	–	1/1[a]	СТО 11605031-006
Совместимость с резинами:			
Набухание, %	–	20.4/25.0[a]	СТО 11605031-110
Вымывание, %	–	14.2/14.6[a]	СТО 11605031-110
Концентрация фактических смол, мг на 100 см^3 бензина	–	7/7[a]	СТО 11605031-110
Низшая теплота сгорания, МДж/кг, не менее	41.0	43.0	ГОСТ 21261
Распределение детонационной стойкости по фракциям, не менее:			
коэффициент распределения детонационной стойкости по фракциям (КРДС)	0.78	0.96	ГОСТ 26370
октановое число фракции, перегоняющейся до 100 °С (ИОЧ100), для бензина типа АИ-100	88	103.7	ГОСТ 26370

[a] В числителе приведены результаты испытаний опытно-промышленной партии бензина, в знаменателе – товарного бензина.

в тяжелом риформате до 1.5 %. Предложено увеличить отбор бензолсодержащей фракции с фактического рабочего значения 9–10 % до 12 %.

На основании данных по моделированию состава автомобильного бензина высокооктанового экологического класса К5 марки АИ-100-К5 (см. табл. 1) наработана опытно-промышленная партия топлива, изучены его физико-химические и эксплуатационные характеристики и проведены квалификационные испытания (ноябрь 2020 года). Установлено, что качество опытно-промышленного партии полностью отвечает требованиям ТР ТС 013/2011 [14], СТО 44905015-005-2017 и нормам, установленным для эксплуатационных свойств автомобильного бензина АИ-100-К5, определяемых квалификационными методами (табл. 2, 3).

Отмечено, что наработанная опытно-промышленная партия высокооктанового бензина АИ-100-К5 обладает улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками, поскольку содержание серы уменьшено до 8.0 мг/кг, бензола – до 0.38 об. %, объемной доли ароматических и олефиновых углеводородов – до 28.6 и 4.2 об. % соответственно, что способствует снижению склонности к отложениям и приводит к уменьшению выбросов при его применении [15].

Важной характеристикой автомобильных бензинов является коэффициент распределения детонационной стойкости по фракциям (КРДС), который определяется как отношение полученных по исследовательскому методу октановых чисел (ИОЧ) фракций бензина, выкипающих в пределах: температура начала кипения–100 °С (НК–100 °С) и 100 °С–температура конца кипения (100°С–КК) [16–19]. Нами показано (см. табл. 3), что для испытуемой опытно-промышленной партии автомобильного бензина марки АИ-100-К5 значение коэффициента распределения детонационной стойкости по фракциям близко к идеальному (КРДС = 1) [1] и равно 0.96, что свидетельствует о стабильности антидетона-

ТАБЛИЦА 4

Результаты определения отложений на впускных клапанах и нагара в камере сгорания

Показатель	Норма	Результат испытаний		Δ (АИ-100-К5 – АИ-98-К5)
		АИ-98-К5 (бензин сравнения)	АИ-100-К5	
Склонность бензина к образованию отложений на впускном клапане, мг/клапан	Не нормируется	132.0	104.5	−27.5
Склонность бензина к образованию нагара в камере сгорания, мг/двигатель	Не нормируется	5480	5150	−330

ТАБЛИЦА 5

Результаты сравнительных стендовых испытаний автомобильных бензинов АИ-100-К5 и АИ-98-К5 по оценке изменения мощностных и экономических показателей и эмиссии вредных веществ двигателя

Показатель	Единицы измерения	Результат испытаний		Δ (АИ-100-К5 – АИ-98-К5)
		АИ-98-К5 (бензин сравнения)	АИ-100-К5	
Мощность при полной нагрузке	кВт	43.8	44.2	0.4
Минимальный удельный расход топлива	кг/(кВт · ч)	0.296	0.289	−0.007
Объемная доля CO	об. %	0.14	0.12	−0.02
Объемная доля CH	м. д.*	96	88	−8
Объемная доля NO_x	м. д.*	1052	1009	−43

* Миллионная доля.

ционных свойств бензина в условиях его фракционирования во впускном коллекторе двигателя.

Для стендовых испытаний по подтверждению эксплуатационных характеристик автомобильного бензина был использован двигатель Mercedes-Benz M 102 E. В табл. 4 приведены результаты сравнительных стендовых испытаний образцов автомобильных бензинов АИ-100-К5 и АИ-98-К5 (бензин сравнения) по методу CEC F-05-93 для оценки склонности к образованию отложений на впускных клапанах и нагара в камере сгорания двигателя.

На основании моторно-стендовых испытаний установлено, что автомобильный бензин АИ-100-К5 обладает пониженной склонностью к образованию отложений на впускных клапанах и нагара в камере сгорания двигателя. Как известно, подобные отложения в двигателе приводят к снижению мощности, ухудшению его топливной экономичности и экологических показателей. Таким образом, снижение низкотемпературных и высокотемпературных отложений в двигателе повышает его надежность.

Влияние образцов автомобильных бензинов АИ-100-К5 и АИ-98-К5 (бензин сравнения) на мощностные и экологические показатели работы автомобильной техники, а также на топливную экономичность определялось по СТО 11605031-059-2012 (табл. 5).

На основании положительных результатов проведенных испытаний на соответствие автомобильного бензина АИ-100-К5 требованиям ТР ТС 013/2011 [14] для экологического класса К5, СТО 44905015-005-2017 и нормам методов квалификационной оценки автомобильного бензина подтверждена технологическая готовность производства автомобильного бензина марки АИ-100-К5. Установлено, что выработанный высокооктановый бензин обладает улучшенными эксплуатационными и экологическими свойствами: высоким коэффициентом распределения детонационной стойкости, сниженным содержанием серы, бензола, ароматических и олефиновых углеводородов, а следовательно, способствует понижению расхода топлива, снижению коррозионной активности, приводит к уменьшению токсичности выхлопных газов.

ВЫВОДЫ

1. Предложены подбор и оптимизация технологических параметров процесса риформинга, заключающиеся в повышении температуры на входе в реакторы на 1 °С и увеличении отбора бензолсодержащей фракции при фракционировании катализата, позволившие получить тяжелый риформат (100–200 °С) требуемого качества по октановому числу – 99.5/89.5 (ИОЧ/МОЧ) –

и использовать его в качестве высокооктанового компонента при производстве бензина АИ-100-К5.

2. Вовлечение данного тяжелого риформата в рецептуру, оптимизированную с помощью программного обеспечения Aspen PIMS program, позволяет получить топливо, полностью отвечающее требованиям ТР ТС 013/2011, СТО 44905015-005-2017, обладающее улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками, пониженной склонностью к образованию отложений на впускных клапанах и нагара в камере сгорания двигателя (согласно данным моторно-стендовых и квалификационных испытаний).

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-1015п).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Капустин В. М. Технология производства автомобильных бензинов. М.: Химия, 2015. 256 с.
2 Бензин АИ-100: лить или не лить? [Электронный ресурс]. URL: https://www.zr.ru/content/articles/920573-benzin-ai100-lit-ili-ne-lit/ (дата обращения: 02.03.2023).
3 Что такое 100-ый бензин [Электронный ресурс]. URL: https://www.petrolplus.ru/article/benzin-s-oktanovym-chislom-100/ (дата обращения: 02.03.2023).
4 Kolyvanov N. A., Oparina L. A., Ganina A. A., D'yachkova S. G. Aryl butyl acetals as oxygenate octane-enhancing additives for motor fuels // Pet. Chem. 2020. Vol. 60, No. 1. P. 134–139.
5 Ганина А. А., Кузора И. Е., Дьячкова С. Г., Дубровский Д. А., Волегова А. Ю., Догадин О. Б. Химический и химмотологический анализ малотоннажных октаноповышающих добавок к моторным топливам // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2018. № 3. С. 47–49.
6 Ганина А. А., Дьячкова С. Г., Ковалева Е. Б. Кузора И. Е., Артемьева Ж. Н., Дубровский Д. А. Влияние двухкомпонентных смесей простых эфиров и спиртов на эксплуатационные свойства автомобильных бензинов // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30, № 4. С. 364–373.
7 ГОСТ 32513. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 10 с.
8 ГОСТ 8226. Топливо для двигателей. Исследовательский метод определения октанового числа. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.
9 ГОСТ 511. Топливо для двигателей. Моторный метод определения октанового числа. М.: Стандартинформ, 2016. 42 с.
10 ГОСТ 14921-78. Газы углеводородные сжиженные. Методы отбора проб. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.
11 ГОСТ 2517-2012. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.
12 Aspen PIMS program (Process Industry Modeling System) [Electronic resource]. URL: https://www.aspentech.com/en/resources/brochure/aspen-pims-family (accessed 02.03.2023).
13 Раскулова Т. В., Фереферов М. Ю., Кузора И. Е., Раскулов Р. М., Черниговская М. А. Технология переработки жидких и газообразных природных энергоносителей: учеб. пособие. Ангарск: Изд-во Ангарского гос. техн. ун-та, 2017. 316 с.
14 Решение Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 826 «О принятии технического регламента Таможенного союза "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту"» [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/documens/902307831 (дата обращения: 02.03.2023).
15 Белянин Б. В., Эрих В. Н. Технический анализ нефтепродуктов и газа. Л.: Химия, 1979. 84 с.
16 ГОСТ 26370-84. Бензины автомобильные. Метод оценки распределения детонационной стойкости по фракциям. М.: Изд-во стандартов, 1985. 5 с.
17 Емельянов В. Е., Крылов И. Ф. Автомобильный бензин и другие виды топлива. Свойства, ассортимент, применение. М.: Астрель, 2005. 207 с.
18 Costa D. R. Gasoline octane number determination // Combustion. 1968. Vol. 39, No. 3. Art. 18.
19 Abdellatief T. M. M., Ershov M. A., Kapustin V. M., Abdelkareem M. Ali, Oladi A. G., Kamil M. Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review // Fuel. 2021. Vol. 291. Art. 120122.