

УДК 62-932.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОМПАУНДИРОВАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

*Г.Н. Рогачев**, *Ю.С. Труфанов***

*Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**ООО «ЛАБВЭА»
Россия, 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, 36, стр. 1

E-mail: grogachev@mail.ru; trufanov@list.ru

***Аннотация.** Процесс компаундирования, смешивания нескольких видов топлива для получения продуктов заданного качества позволяет получать бензин с требуемыми свойствами. Традиционно приготовление бензинов происходит в резервуарах. В качестве компонентов выступают высокооктановые присадки, компоненты бензина с технологических установок и компоненты из других резервуаров. Компаундирование является завершающим процессом приготовления бензинов, поэтому подготовка и проведение его определяют качество товарной продукции. Существующий способ компаундирования на производстве является многоступенчатой операцией, включающей определение количества смеси компонентов в резервуаре, подбор количества присадок, перемешивание всех компонентов и присадок, лабораторный анализ и выдачу паспорта качества на резервуар. Этот способ может быть оптимизирован за счет исключения ряда операций и осуществления расчета требуемого количества компонентов до их направления в резервуар. Задача компаундирования может быть сформулирована так: требуется в конкретном резервуаре с известным качеством и количеством остатка приготовить необходимое количество товарного бензина. Кроме того, в процессе разработки рецептуры товарного бензина и технологии его приготовления желательно наиболее полно использовать все имеющиеся бензиновые фракции при минимальном использовании самой дорогой части товарного бензина – присадок. Задача оптимизации компонентного состава товарных бензинов решается в работе методом линейного программирования и основывается на показателях качества имеющихся компонентов и задании заводу по выпуску отдельных марок бензинов. Приведены примеры определения наиболее целесообразного и экономически выгодного соотношения компонентов для некоторых партий бензина. Сформулирована и решена задача выбора конкретного резервуара, в котором при текущих ограничениях можно приготовить продукт требуемого качества при минимальном потреблении присадки. Сделан вывод, что для прозрачности и точности учета осуществление конкретных производственных операций приготовления товарных бензинов необходимо производить по методике пооперационного учета. Рекомендовано применение методики пооперационного учета при компаундировании товарных нефтепродуктов, что позволяет значительно повысить качество производственного учета.*

* Геннадий Николаевич Рогачев, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

** Юрий Сергеевич Труфанов, ведущий консультант.

***Ключевые слова:** компаундирование, компоненты, присадки, оптимизация, линейное программирование, пооперационный учет.*

Введение

Компаундирование является рациональным способом приготовления товарных бензинов [1], так как позволяет наиболее полно использовать свойства бензиновых фракций различных процессов переработки нефти и получать продукцию, отвечающую всем требованиям.

В настоящее время распространены два подхода к приготовлению товарных нефтепродуктов: с использованием станций смешения и резервуарный метод. На современных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) используются специализированные станции смешения товарных бензинов, которые готовят бензины в потоке. Станции смешения, хотя и обеспечивают технологичный способ компаундирования, требуют существенных затрат на проектирование, закупку оборудования и техническое обслуживание. Хотя строительство таких установок является перспективным направлением автоматизации процессов по приготовлению товарных бензинов, подобные станции на настоящий момент имеются далеко не на всех российских НПЗ. В этом случае приготовление бензинов происходит в резервуарах товарно-сырьевых парков (ТСП) [2–7]. Приготовление товарных нефтепродуктов в резервуарах не требует затрат на переоснащение и позволяет добиться требуемых качественных показателей получаемых товарных продуктов в полном ассортименте выпускаемой продукции.

Технология компаундирования

Поскольку компаундирование является завершающим процессом приготовления бензинов, его подготовка и проведение обуславливают качество товарной продукции, соответствие требованиям стандартов. Прежде чем приступить к компаундированию, разрабатывают рецептуру товарного бензина и технологию его приготовления. Рецептура товарного бензина основывается на показателях качества имеющихся компонентов и задании заводу по выпуску отдельных марок бензинов. Существующий метод компаундирования на производстве предусматривает следующую последовательность операций:

- направление в резервуар с остатком от предыдущей операции потоков компонентов с технологических установок;
- достижение в резервуаре нужного количества смеси компонентов для получения в последующем требуемого количества товарного бензина;
- лабораторный анализ образца для определения качества смеси компонентов в резервуаре;
- определение количества смеси компонентов в резервуаре;
- расчет количества присадки (присадок), которое нужно переместить в резервуар для получения продукта товарного качества;
- перемещение рассчитанного количества присадки (присадок) в резервуар;
- переход резервуара на циркуляцию для того, чтобы добиться равномерного перемешивания всех компонентов и присадок, перемещенных в резервуар;
- отбор полученной в резервуаре смеси на лабораторный анализ, по результатам которого может быть принято решение, что получен товарный бензин;
- выдача паспорта качества на резервуар.

Определение рецептуры предполагает вычисление наиболее целесообразного и экономически выгодного соотношения компонентов для каждой партии бензи-

на. Традиционно на НПЗ используется переборный алгоритм определения рецептуры, подбор компонентов происходит итерационно.

Существующий подход может быть оптимизирован за счет изменения или исключения ряда операций, а также за счет расчета количеств компонентов товарного бензина до направления потоков компонентов в резервуар. Предлагаемый оптимизированный порядок операций состоит из следующих этапов:

- из имеющихся сведений (паспорт продукции на предыдущую партию товара и данные пооперационного учета) определяется качество и количество остатка товарного бензина;

- качество высокооктановой присадки определяется по паспортным данным на эту присадку;

- качество компонентов бензина с технологических установок берется на основании плановых значений с учетом фактического режима работы установок (если установка работает в стабильном режиме, то качество компонентов максимально приближено к плановому);

- количество (пропорции) вырабатываемых компонентов определяется согласно утвержденным балансам технологических установок (если установка работает в стабильном режиме, то количество выработки компонентов максимально приближено к плановому);

- на основании заранее известных сведений производится определение минимального количества высокооктановой присадки;

- рассчитанное количество присадки направляется в резервуар, для которого произведен расчет, совместно с компонентами бензина с технологических установок;

- полученная в резервуаре смесь отбирается на лабораторный анализ, по результатам которого может быть принято решение, что получен товарный бензин;

- выдается паспорт качества на резервуар.

Предлагаемое решение в части изменения или исключения ряда операций позволяет получить в резервуаре товарный продукт за значительно меньшее время, без применения операции циркуляции и с минимальным использованием самой дорогой части товарного бензина – присадок. Эта задача оптимизации компонентного состава товарных бензинов решается методом линейного программирования [8]. Такой подход и рассматривается как оптимальный в рамках настоящей статьи. Задача расчета количества присадки и количеств компонентов бензина с технологических установок и из других резервуаров ТСП рассматривается в следующем разделе.

Задача минимизации потребления присадок при компаундировании товарного бензина как задача линейного программирования

Задача подбора оптимальных количеств компонентов нефтепродуктов может быть решена как задача линейного программирования. Эта задача может быть сформулирована так: требуется в конкретном резервуаре ТСП с известным качеством и количеством остатка приготовить посредством смешивания компонентов необходимое количество товарного бензина при минимизации количества высокооктановых присадок. В качестве компонентов выступают:

- высокооктановые присадки;

- компоненты бензина с технологических установок;

- компоненты бензина из других резервуаров ТСП.

Формальное описание процесса компаундирования имеет следующий вид. Пусть имеется единственный источник высокооктановой присадки и $n-1$ источников компонентов бензина с технологических установок и из других резервуаров ТСП. Объем источника высокооктановой присадки равен V_1 , объемы других источников бензина равны $V_i, i = \overline{2, n}$. Обозначим как O_1 и $O_i, i = \overline{2, n}$ соответственно октановые числа присадки и иных компонентов. Требуется получить $K \text{ м}^3$ бензина с октановым числом O_K . Для этого смешивают в резервуаре, где имеется остаток с качеством O_{n+1} и количеством $V_{n+1} = D_{n+1}$, некоторое количество $D_i, i = \overline{1, n}$ компонентов, состоящих из высокооктановой присадки, и компонентов бензина с технологических установок и из других резервуаров ТСП. Если компаундирование происходит в пустом резервуаре, то $V_{n+1} = D_{n+1} = 0$.

Задача формулируется следующим образом. Заданы первоначальное количество компонентов $V_i \geq 0, i = \overline{1, n+1}$ и октановые числа компонентов $O_i \geq 0, i = \overline{1, n+1}$. Требуется определить количество $D_i, i = \overline{1, n}$ компонентов при условии, что получен нужный объем бензина $\sum_{i=1}^{n+1} D_i = K$, бензин имеет требуемое октановое число $\sum_{i=1}^{n+1} D_i \cdot O_i / \sum_{i=1}^{n+1} D_i = O_K$, а количество используемых компонентов не превышает имеющихся ресурсов, т. е. $D_i \leq V_i, i = \overline{1, n}$. В качестве минимизируемого критерия качества выступает количество используемой высокооктановой присадки, $D_1 \rightarrow \min_{D_i, i=1,2,\dots,n}$.

В общем случае задача линейного программирования формулируется так [9]: определить вектор \vec{x} , доставляющий $\min_{\vec{x}} \vec{f}^T \vec{x}$ при условии

$$\begin{cases} A \cdot \vec{x} \leq \vec{b}; \\ A_{eq} \cdot \vec{x} = \vec{b}_{eq}; \\ \vec{b}_L \leq \vec{x} \leq \vec{b}_U. \end{cases} \quad (1)$$

Применительно к рассматриваемому случаю формулировка имеет следующий вид: искомый вектор $\vec{x} = [D_1, D_2, \dots, D_n]$, где D_1 – минимизируемое количество используемой при компаундировании высокооктановой присадки, а D_2, \dots, D_n – количество используемых компонентов бензина с технологических установок. Имеют место ограничения на получаемое количество K бензина требуемого качества и на его октановое число O_K . Эти ограничения приобретают вид равенств $\sum_{i=1}^{n+1} D_i = K, \sum_{i=1}^{n+1} O_i D_i = O_K \cdot K$, которые с целью привести задачу к соотношению (1) преобразуются в выражения $\sum_{i=1}^n O_i D_i = O_K \cdot K - O_{n+1} D_{n+1},$

$\sum_{i=1}^n D_i = K - D_{n+1}$. Тогда матрица A_{eq} и вектор \vec{b}_{eq} записываются так:

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} O_1 & O_2 & \dots & O_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \vec{b}_{eq} = [O_K \cdot K - O_{n+1} \cdot D_{n+1}, K - D_{n+1}, \dots, 0]^T.$$

Ограничение на объемы используемых компонентов имеет вид двойного неравенства $0 \leq D_i \leq V_i$, $i = \overline{1, n}$. Это предполагает, что в (1) $\vec{b}_L = [0, 0, \dots, 0]^T$, $\vec{b}_U = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$. Определению подлежит набор компонентов $\vec{x} = [D_1, D_2, \dots, D_n]$, при котором имеет место $\min_{D_i, i=1,2,\dots,n} D_1$. В постановке (1) это эквивалентно заданию $\vec{f} = [1 \ 0 \ 0 \dots \ 0]$.

Для решения сформулированной задачи используем Matlab Optimization Toolbox, процедуру решения задач линейного программирования linprog [10]. Обращение к этой процедуре имеет вид $x = \text{linprog}(f, [], [], Aeq, beq, lb, ub)$.

Далее в табл. 1–3 приведены результаты расчетов с исходными данными, соответствующими некоторым характерным случаям. В табл. 1 приводятся результаты вычислений, когда требуется получить 4500 м³ бензина с октановым числом 98. Рассматривается модельный случай, когда компаундирование происходит в пустом резервуаре.

Таблица 1

Пример 1 расчета компонентов для приготовления бензина АИ-98

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 820$	1180
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 0$	2000
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 0$	1500
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 1680$	1320
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итог по резервуару 7		$O_K = 98$		$K = 4500$

Действительно, произведено $820 + 1680 + 2000 = 4500$ м³ бензина с октановым числом $(118 \cdot 820 + 93 \cdot 1680 + 94 \cdot 2000) / 4500 = 98$. Для этого потрачено 820 м³ дорогостоящего компонента – присадки. Полученный результат подтверждает корректность использования в расчетах оптимизационного подхода. Оптимальное решение поддается простому объяснению. Для приготовления товарной продукции используют тот бензин, который имеет октановое число, максимально близкое к требуемому (в данном случае это бензин из резервуаров 5 и 6). Присадка используется в минимальном объеме, необходимом для доведения октанового числа этой смеси до необходимого уровня.

Пусть теперь при тех же исходных данных поступил заказ на изготовление 4500 м³ бензина с октановым числом 92. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Пример 2 расчета компонентов для приготовления бензина АИ-92

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 0$	2000
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 142.86$	1857,14
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 1500$	0
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 857.14$	2142.86
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итого по резервуару 7		$O_K = 92$		$K = 4500$

Вновь оптимальное решение легко объясняется. Для приготовления товарной продукции используют бензин, имеющий максимально близкое к требуемому октановое число (в данном случае это бензин из резервуаров с третьего по шестой). Необходимость в использовании присадки отсутствует, количества и качества имеющихся остатков достаточно для доведения октанового числа смеси до необходимого уровня.

Рассмотрим при тех же исходных данных гипотетический случай изготовления 4500 м³ бензина с октановым числом 80. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Пример 3 расчета компонентов для приготовления бензина АИ-80

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 0 = 0$	2000
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 1916.67$	1083.33
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 2000$	0
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 583.33$	916.67
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 500$	2500
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итого по резервуару 7		$O_K = 80$		$K = 4500$

Имеет место случай, аналогичный рассмотренному в примере 2. Для приготовления товарной продукции используют бензин, имеющий максимально близкое к требуемому октановое число (в данном случае это бензин из резервуаров со второго по четвертый). Необходимость в использовании присадки отсутствует, количества и качества имеющихся остатков достаточно для доведения октанового числа смеси до необходимого уровня.

Следующий вопрос, требующий обсуждения, состоит в следующем. Влияет ли на потребление самого дорогостоящего компонента – присадки – порядок изготовления товарного бензина и возобновляется ли после каждой операции набор

доступных компонентов? Рассмотрим случай, когда производится бензин марки АИ-98 и АИ-80 (табл. 4), причем порядок, в котором происходит компаундирование, не оговаривается. Кроме того, при производстве бензина второй марки используется тот бензин, что остался в резервуарах после производства бензина первой марки. Очевидно, что поскольку, как следует из табл. 1 и 3, при производстве используется бензин из разных резервуаров (при производстве АИ-80 используется бензин из резервуаров 2, 3, 4, а при производстве АИ-98 – из резервуаров 5, 6), результат будет идентичен безотносительно порядка изготовления бензинов. Строки 1, 5, 6 табл. 4 совпадают с соответствующими строками табл. 1, а строки 2, 3, 4 – с соответствующими строками табл. 3. Общее количество израсходованной присадки равно суммарному количеству присадки, потраченному по отдельности в двух этапах.

Таблица 4

Пример 4 расчета компонентов для последовательного приготовления бензина АИ-80 и АИ-98

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 820$	1180
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 1916.67$	1083.33
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 2000$	0
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 583.33$	916,67
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 1680$	1320
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итог по резервуару 7		$O_K = 80$		$K = 4500$
Итог по резервуару 8		$O_K = 98$		$K = 4500$

Этот же вывод об инвариантности к последовательности, в которой производится компаундирование, справедлив и для случая, когда при поочередном компаундировании используется бензин из одних и тех же резервуаров. Рассмотрим случай, когда производится бензин марки АИ-98 и АИ-92 (табл. 5 и 6). Как следует из табл. 1 и 2, бензин из шестого резервуара в случае отдельных операций должен полностью использоваться в обоих случаях. Табл. 5 и 6 показывают, как происходит компаундирование при последовательном приготовлении бензина АИ-92 и АИ-98 с использованием одних и тех же резервуаров. В примере 5 вначале вырабатывается бензин АИ-92, а затем из оставшихся компонентов вырабатывается бензин АИ-98. В примере 6, наоборот, вначале вырабатывается бензин АИ-98, а затем из оставшихся компонентов вырабатывается бензин АИ-92.

Из приведенных примеров 5 и 6 следует, что общее количество потраченной присадки одинаково и составляет $1423,08 \text{ м}^3$, хотя по этапам затраты распределены неравномерно. В первом случае все количество присадки пришлось на вторую стадию, во втором было потрачено 820 м^3 присадки для производства бензина АИ-98, что соответствует примеру 1. Для приготовления бензина АИ-92 понадобилось $603,08 \text{ м}^3$ присадки, хотя в раздельном режиме (пример 2) присадка не тратилась. Существенная разница в $603,08 \text{ м}^3$ (или 73,5 %) образовалась за счет того, что после каждой операции набор доступных компонентов не возобновлял-

ся. Это служит серьезным основанием в пользу использования в качестве источников компонентов технологических установок непрерывного цикла, а не резервуаров.

Таблица 5

Пример 5 расчета компонентов для последовательного приготовления бензина АИ-92 и АИ-98

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Приготовление бензина АИ-92				
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 0$	2000
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 142.86$	1857.14
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 1500$	0
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 857.14$	2142.86
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итого по резервуару 7		$O_k = 92$		$K = 4500$
Приготовление бензина АИ-98				
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 1423.08$	576.92
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 1857.14$	$O_3 = 79$	$D_3 = 934.07$	923.08
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 0$	$O_4 = 90$	$D_4 = 0$	0
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 2142.86$	$O_5 = 93$	$D_5 = 2142.86$	0
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 0$	$O_6 = 94$	$D_6 = 0$	0
Итого по резервуару 8		$O_k = 98$		$K = 4500$

Существенным доводом в пользу подобного рода расчетов является то, что их можно проводить и после приготовления бензина, например для проверки соответствия количества фактически использованной присадки тем сведениям, которые передал оперативный персонал.

Подобные критерии могут быть сформулированы и для других нефтепродуктов, которые также компаундируются в резервуарах ТСП [11]. В частности, рассмотренный способ решения задачи оптимального компаундирования можно распространить на следующие критерии оптимизации процесса приготовления товарных бензинов:

- максимизация вовлечения количества низкооктановых компонентов;
- максимизация вовлечения количества компонентов, имеющих низкую рыночную стоимость;
- приготовление бензина требуемого качества на имеющемся остатке в резервуаре;
- максимизация вовлечения в приготовление бензина имеющихся остатков в нескольких резервуарах;
- минимизация вовлечения количества высокооктановых компонентов и присадок;

- минимизация вовлечения количества компонентов, имеющих высокую стоимость;
- максимизация/минимизация/точное количество вовлечения конкретного компонента.

Таблица 6

Пример 6 расчета компонентов для последовательного приготовления бензина АИ-98 и АИ-92

Наименование компонента	Исходное количество	Октановое число	Используемое количество	Остаток
Приготовление бензина АИ-98				
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 2000$	$O_1 = 118$	$D_1 = 820$	1180
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 0$	2000
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 0$	1500
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 3000$	$O_5 = 93$	$D_5 = 1680$	1320
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 2000$	$O_6 = 94$	$D_6 = 2000$	0
Итог по резервуару 7		$O_K = 98$		$K = 4500$
Приготовление бензина АИ-92				
Присадка в резервуаре 1	$V_1 = 1180$	$O_1 = 118$	$D_1 = 603.08$	576.92
Бензин в резервуаре 2	$V_2 = 3000$	$O_2 = 78$	$D_2 = 0$	3000
Бензин в резервуаре 3	$V_3 = 2000$	$O_3 = 79$	$D_3 = 1076.92$	923.08
Бензин в резервуаре 4	$V_4 = 1500$	$O_4 = 90$	$D_4 = 1500$	0
Бензин в резервуаре 5	$V_5 = 1320$	$O_5 = 93$	$D_5 = 1320$	0
Бензин в резервуаре 6	$V_6 = 0$	$O_6 = 94$	$D_6 = 0$	0
Итог по резервуару 8		$O_K = 98$		$K = 4500$

В том случае, когда необходимо обеспечить экстремум по нескольким критериям качества одновременно, используется многокритериальная постановка задачи.

Применение при компаундировании «виртуального расходомера» и методики пооперационного учета

Для достижения оптимального качестваготавливаемого товарного продукта в резервуарах ТСП эффективным будет применение двух инструментов, рассмотренных в работах [2–4, 7, 11–13], – пооперационного учета и «виртуального расходомера».

«Виртуальный расходомер» может применяться оперативным персоналом для процесса вовлечения требуемого количества высокооктановой присадки. Резервуар с присадкой может иметь значительно большее количество высокооктановой присадки, чем требуется для конкретной операции. В этом случае «виртуальный расходомер» может служить индикатором того, что перекачка начата, и того, с каким расходом она идет. Также, решив задачу (1), можно определить точное количество присадки, которое необходимо переместить для выполнения

этой операции. «Виртуальный расходомер» позволяет оперативному персоналу визуализировать расход нефтепродукта в трубопроводах для принятия оперативных решений. Отобразив значение расхода присадки, «виртуальный расходомер» позволит определить время, оставшееся до конца операции.

Методика пооперационного учета прямо влияет на качество учета партий нефтепродуктов при компаундировании. Известно [6], что применяемый подход к измерениям характеризуется низким их качеством. Не учитываются возможные потери нефтепродуктов. Рассчитанное качество нефтепродукта даже после точного расчета может быть не достигнуто из-за вовлечения неверных количеств компонентов нефтепродукта и высокооктановых присадок. Предлагаемый подход к измерениям на основе пооперационного учета позволяет повысить качество измерений [3, 12], получить товарный нефтепродукт, который к моменту окончания закачки содержит все необходимые компоненты и требует значительно меньшего времени на циркуляцию или на перемешивание в резервуаре.

Выводы

Компаундирование товарного бензина в резервуарах товарно-сырьевых парков – важный производственный процесс, широко применяемый в настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах. Затраты на приготовление товарного бензина могут быть снижены за счет оптимизации количества и качества отдельных операций. В статье приводятся рекомендации по сокращению длительности отдельных операций. Значительно повысить качество производственного учета при компаундировании товарных нефтепродуктов позволяет применение методики пооперационного учета и инструментария «виртуальный расходомер». Использование методики и инструментария позволяет обеспечить совпадение расчетных и реальных данных на начало операции.

Еще одним элементом оптимизации процесса компаундирования является процедура минимизации количества применяемых присадок как самых дорогих компонентов бензина. Задача подбора оптимальных количеств компонентов нефтепродуктов с целью минимизации количества вовлекаемых присадок может быть решена как задача линейного программирования. В работе сформулирована и решена оптимизационная задача выбора рецептуры продукта с требуемым качеством при минимальном потреблении присадки.

Решена задача последовательного приготовления ряда продуктов при минимальном потреблении присадки. Показано, что в рассматриваемых примерах приготовления ряда продуктов имеет место инвариантность необходимого количества присадки к последовательности, в которой производится компаундирование. Инвариантность наблюдается также в том случае, когда при последовательном компаундировании используется бензин из одних и тех же резервуаров. Однако при этом расход присадки существенно выше, чем при поочередном компаундировании в условиях возобновляемых источников компонентов. Сделан вывод, что в этом случае целесообразно использование в качестве источников компонентов технологических установок непрерывного цикла, а не резервуаров.

Указано, что подобный расчет можно проводить также после фактического приготовления бензина, например для проверки соразмерности количества фактически вовлеченной присадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гуреев А.А., Жоров Ю.М., Смидович Е.В.* Производство высокооктановых бензинов. М.: Химия, 1981. 224 с.
2. *Trufanov Y., Mitroshin V.* The Criterion of Permissible Deviations Accounting Batches of Petroleum Products. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 753. 082019. 10.1088/1757-899X/753/8/082019.
3. *Труфанов Ю.С.* Пооперационный учет количества нефтепродуктов в товарно-сырьевых парках // Вестник науки. Сборник статей по материалам VI международной научно-практической конференции. Актуальные вопросы в науке и практике. 2018. Ч. 3(4). С. 114–124.
4. *Труфанов Ю.С.* О функционале качества специализированного программного обеспечения учета движения массы нефтепродуктов в товарно-сырьевых парках // Вестник СамГТУ. 2018. № 1. С. 38–46.
5. *Закожурников Ю.А.* Хранение нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие для СПО. Волгоград: Ин-Фолио, 2010. 432 с.
6. ГОСТ 2517-85: Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб.
7. *Труфанов Ю.С.* Математическая модель количества нефтепродукта в резервуарном парке // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». 2015. № 1. С. 73–75.
8. *Копысицкий Т.И., Рзаев Ю.Р.* Сведение и оценка точности материального баланса на технологических установках НПЗ // Нефтепереработка и нефтехимия. 2012. № 11. С. 3.
9. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. 3-е изд. М.: Наука, 1986. 288 с.
10. MathWorks. Help Center. linprog. Solve linear programming problems. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html?s_tid=srchtitle_linprog_1
11. *Труфанов Ю.С.* Всероссийский конкурс «Новая идея» на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи предприятий и организаций топливно-энергетического комплекса. Материалы конкурса. М.: ФГАОУ ДПО «ИПК ТЭК», 2015. С. 172–181.
12. *Труфанов Ю.С.* Повышение достоверности материального баланса НПЗ путем моделирования количества нефтепродукта в резервуарных парках // Бурение и нефть. 2015. № 11. С. 31.
13. *Труфанов Ю.С.* Динамическое определение количества и потенциала топлива в резервуарном парке // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2017. № 3. С. 188–191.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2022 г.

OPTIMIZATION OF THE COMPOUNDING PROCESS OF PETROLEUM PRODUCTS

G.N. Rogachev*, Yu.S. Trufanov**

*Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

**LLC LabWare
36, Lyusinovskaya st., Moscow, 115093, Russia

E-mail: grogachev@mail.ru; trufanov@list.ru

Annotation. *The process of compounding, mixing several types of fuel to obtain products of a given quality, makes it possible to obtain gasoline with the required properties. Traditionally, the preparation of gasolines takes place in tanks. The components are high-octane additives, gasoline components from process plants and components from other tanks. Compounding is the final process for the preparation of gasoline, so its preparation and conduct determine the quality of commercial products. The existing method of compounding in production is a multi-stage operation, including determining the amount of a mixture of components in a tank, selecting the amount of additives, mixing all components and additives, laboratory analysis and issuing a quality certificate for the tank. This method can be optimized by eliminating a number of operations and calculating the required number of components before they are sent to the tank. The task of compounding can be formulated as follows: it is required to prepare the required amount of commercial gasoline in a specific tank with a known quality and amount of residue. In addition, in the process of developing a commercial gasoline formulation and technology for its preparation, it is desirable to use all available gasoline fractions to the fullest extent with minimal use of the most expensive part of commercial gasoline - additives. The problem of optimizing the component composition of commercial gasoline is solved in the work by the method of linear programming and is based on the quality indicators of the available components and the task for the plant to produce certain brands of gasoline. Examples of determining the most expedient and cost-effective ratio of components for some batches of gasoline are given. The problem of choosing a specific tank is formulated and solved, in which, under the current restrictions, it is possible to prepare a product of the required quality with a minimum consumption of the additive. It is concluded that for transparency and accuracy of accounting, the implementation of specific production operations for the preparation of commercial gasoline must be carried out according to the method of operational accounting. It is recommended to use the methodology of step-by-step accounting when compounding marketable petroleum products, which can significantly improve the quality of production accounting.*

Keywords: *compounding, components, additives, optimization, linear programming, operational accounting.*

REFERENCES

1. Gureyev A.A., Zhorov Yu.M., Smidovich Ye.V. Proizvodstvo vysokooktanovykh benzinov. M.: Khimiya, 1981. 224 p.
2. Trufanov Y., Mitroshin V. The Criterion of Permissible Deviations Accounting Batches of Petroleum Products. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 753. 082019. 10.1088/1757-899X/753/8/082019.

* Gennadiy N. Rogachev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

** Yuri S. Trufanov, Lead consultant.

3. *Trufanov Yu.S.* Pooperatsionnyy uchet kolichestva nefteproduktov v tovarno-syr'yevykh parkakh // Vestnik Nauki. Sbornik statey po materialam VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Aktual'nyye voprosy v nauke i praktike. 2018. Chast' 3(4). Pp. 114–124.
4. *Trufanov Yu.S.* O funktsional'e kachestva spetsializirovannogo programmnoy obespecheniya ucheta dvizheniya massy nefteproduktov v tovarno-syr'yevykh parkakh // Vestnik SamGTU. 2018. № 1. Pp. 38–46.
5. *Zakozhurnikov Yu.A.* Khraneniye nefi, nefteproduktov i gaza: uchebnoye posobiye dlya SPO. Volgograd: In-Folio, 2010. 432 pp.
6. GOST 2517-85: Neft' i nefteprodukty. Metody otbora prob.
7. *Trufanov Yu.S.* Matematicheskaya model' kolichestva nefteprodukta v rezervuarnom parke // Nauchno-tekhnicheskii Vestnik OAO "NK Rosneft". 2015. № 1. P. 73–75.
8. *Kopysitskiy T.I., Rzayev Yu.R.* Svedeniye i otsenka tochnosti material'nogo balansa na tekhnologicheskikh ustanovkakh NPZ // Neftepererabotka i neftekhiymiya. 2012. № 11. P. 3.
9. *Karmanov V.G.* Matematicheskoye programmirovaniye. 3-ye izd. M.: Nauka, 1986. 288 p.
10. MathWorks. Help Center. linprog. Solve linear programming problems. https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html?s_tid=srchtitle_linprog_1
11. *Trufanov Yu.S.* Vserossiyskiy konkurs «Novaya ideya» na luchshuyu nauchno-tekhnicheskuyu razrabotku sredi molodezhi predpriyatiy i organizatsiy toplivno-energeticheskogo kompleksa. Materialy konkursa. M.: FGAOU DPO «IPK TEK», 2015. P. 172–181.
12. *Trufanov Yu.S.* Povysheniye dostovernosti material'nogo balansa NPZ putem modelirovaniya kolichestva nefteprodukta v rezervuarnykh parkakh // Bureniye i neft'. 2015. № 11. P. 31.
13. *Trufanov Yu.S.* Dinamicheskoye opredeleniye kolichestva i potentsiala topliva v rezervuarnom parke // Vestnik SamGTU. 2017. № 3. P. 188–191.