

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОМПАУНДИРОВАНИЯ В ПОТОКЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

Мусаев А. А., Никитин В. А.

Аннотация

Предложена динамическая модель для оценивания свойств углеводородных смесей с нелинейным взаимодействием компонентов смешения. На базе модели разработаны алгоритмы оптимального планирования процесса смешения в потоке в линиях налива топлив с различными характеристиками, алгоритмы оптимального управления смешением в линиях и наполнения топливного резервуара в реальном времени.

Работоспособность алгоритмов апробирована при решении задачи оптимизации управления технологическим процессом компаундирования дизельного топлива в потоке.

1. Постановка задачи

Задача оптимизации процесса компаундирования топлив, осуществляемого одновременно в нескольких линиях смешения для получения товарной продукции разных марок, относится к классу задач оптимального управления. К сожалению, на практике, решение данной задачи связано с целым рядом проблем, существенно усложняющих процедуру поиска оптимального решения.

Особенностью задач управления смешением при производстве товарного топлива (бензина или дизельных топлив) является значительное число переменных (компонентов и их параметров) и соответствующих им ограничений. При использовании линейной модели смешения, наиболее очевидный путь решения задачи связан с использованием алгоритмов линейного программирования. Однако для ряда ситуаций весьма комфортное для разработчиков систем оптимизации допущение о линейности процесса компаундирования оказывается в явном противоречии с результатами экспериментов и реального производства. В частности, нефть и ее фракции как углеводородные растворы обнаруживают значительные отклонения от идеальных растворов. Так, например, изменение общего объема результата компаундирования (по сравнению с простой суммой объемов смешиваемых компонентов) свидетельствует о наличии межмолекулярных взаимодействий. При этом степень уменьшения объема зависит от температуры компонентов и среды взаимодействия. В практике компаундирования замечено, что чем больше различаются молекулы смешиваемых компонентов, тем больше наблюдаемые отклонения от поведения идеальных растворов. В этой связи в расчетах часто используют не фактические свойства тех или иных компонентов, а условные характеристики смешения, учитывающие поведение данного компонента в конкретной смеси. Эти же проблемы возникают при случайных флуктуациях свойств компонентов,

Наличие нелинейных эффектов приводит к необходимости использования более сложных математических подходов, связанных с методологией *рестриктивной оптимизации*.

В общем случае процесс компаундирования представляет собой динамическое (в потоке) или статическое (в резервуаре) смешение компонентов для получения товарного продукта заданного качества.

В традиционных статических системах управления компоненты накапливаются в специальных баках-накопителях, осуществляется их физико-химический анализ, формируется рецептура смеси, проводится пробное смешение в небольших объемах, коррекция рецептуры, и только после этого осуществляется окончательное производство товарного продукта. В динамической системе процесс компаундирования осуществляется в потоке. Это приводит к значительной экономии ресурсов и улучшенным характеристикам перемешивания, но требует достаточно сложного адаптивного управления процессом для обеспечения соответствия параметров продукта товарным нормативам из-за того, что базовый поток, как правило, не может регулироваться оператором станции смешения,

В настоящей статье проводится анализ использования адаптивной динамической линеаризованной модели для поточной схемы смешения. При этом решаются три основные задачи компаундирования:

- оптимальное планирование налива по линиям для заданных базовых потоков и учетом запасов компонентов смешения (расчет оптимальных рецептур в линиях налива по заданным критериям);
- оптимальное управление в линиях смешения в реальном времени и реализация виртуального анализа свойств смеси для произвольного момента времени с учетом вариаций базового потока;
- планирование, коррекция и мониторинг налива товарного резервуара с учетом свойств остатка смеси в нем.

Модель смешения дает возможность априорно оценивать компонентный состав для получения смеси с заданными свойствами. На практике эта процедура осложняется наличием нескольких уровней неопределенности, наиболее существенный из которых связан со значительным разбросом свойств поступающих компонентов смешения и различной дискретностью измерений параметров смеси. Это приводит к необходимости использования процедур последовательной коррекции процесса и виртуальных анализаторов свойств смеси в промежутках между анализами, получаемыми из лаборатории. Типовая схема компаундирования дизельного топлива показана на рис.1.

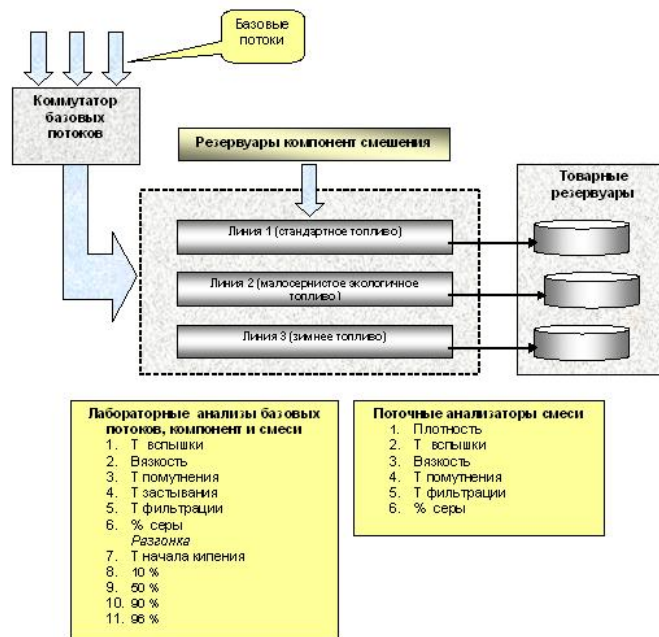


Рис.1 Типовая схема компаундирования дизельного топлива в потоке

Целевой функцией процедуры оптимизации может быть любая линейная функция от расходов компонентов (например, итоговая себестоимость смеси) или от свойств смеси. В приведенной ниже постановке в качестве целевой функции используется массовая доля относительно дешевого сернистого компонента, которая подлежит максимизации при выполнении ограничений на свойства смеси в заданных пределах. Это, в частности, приводит к высоким требованиям к достоверности информации о содержании серы в компонентах смешения.

Задача решается в условиях установленных ограничений на расходы и на свойства смеси. Контроль результата и коррекция процесса проводятся по результатам текущих анализов свойств потоков в линиях.

2. Математическая модель смешения с нелинейным взаимодействием компонентов

Предположим, что смесь составляется из N однотипных компонентов, при этом контролируется M свойств (физико-химических показателей), имеющих одинаковую значимость. Обозначим численные значения i -го свойства смеси через y_i , а его идеальное значение через y_{0i} , $i = 1, \dots, M$. Тот же показатель j -го базового компонента обозначим через q_{ij} , $j = 1, \dots, N$. Массовую долю j -го компонента в смеси обозначим через x_j : $0 \leq x_j \leq 1$,

$$\sum_{j=1}^N x_j = 1.$$

Предположение об аддитивном характере процесса смешения означает, что

$$y_i = \sum_{j=1}^N q_{ij} x_j .$$

Переходя к векторно-матричным обозначениям, введем векторы-столбцы $y = [y_1, \dots, y_M]^T$, $y_0 = [y_{0_1}, \dots, y_{0_M}]^T$, $x = [x_1, \dots, x_N]^T$ и матрицу $Q = [q_{ij}]$, $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$, тогда соотношение (2) примет вид

$$y = Q \times x \quad (1)$$

В работе [1] предложена модификация уравнений (1) вида:

$$y_i = \sum_{j=1}^N q_{ij} a_{ij}(x) x_j \quad (2)$$

где a_{ij} – коэффициенты матрицы поправок A , которые учитывают неаддитивность компонент смешения.

Проблема нахождения матрицы поправок A заключается в том, что ее коэффициенты матрицы существенно зависят от вектора рецептуры смеси C , и изменяются во времени t . Поэтому для решения производственных задач требуется построить аналог модели (2), адаптируемый к текущей рецептуре, состоянию процесса смешения и особенностям взаимодействия компонентов.

Алгоритм получения матрицы A основан на нелинейной идентификационной модели процесса смешения с использованием канонических корреляций входных и выходных параметров процесса компаундирования, причем данные измерителей расхода компонент и анализаторов свойств смеси обрабатываются на скользящем окне данных W .

Использование канонической корреляции позволяет извлечь более полную информацию для расчета матрицы A из значений расходов компонентов и анализов полученной смеси, поскольку учитываются взаимосвязи выходных параметров. При этом точность прогноза свойств смеси находится в пределах 0.6 - 3 %.

Таким образом:

$$A = F(Cw, Qw, \text{cov}(Cw), \text{cov}(Qw), \text{cov}(Cw, Qw), W, t),$$

где cov – оператор вычисления ковариационной матрицы;

Cw - матрица рецептур в окне данных W ;

Qw - матрица свойств компонентов.

Соответственно, свойства смеси y определяются выражением:

$$y = Qw \times A \times x \quad (3)$$

Соотношение между линейной, нелинейной и линеаризованной моделями для одного параметра смеси y_i и случая смешения двух компонентов иллюстрируется на рис.2.

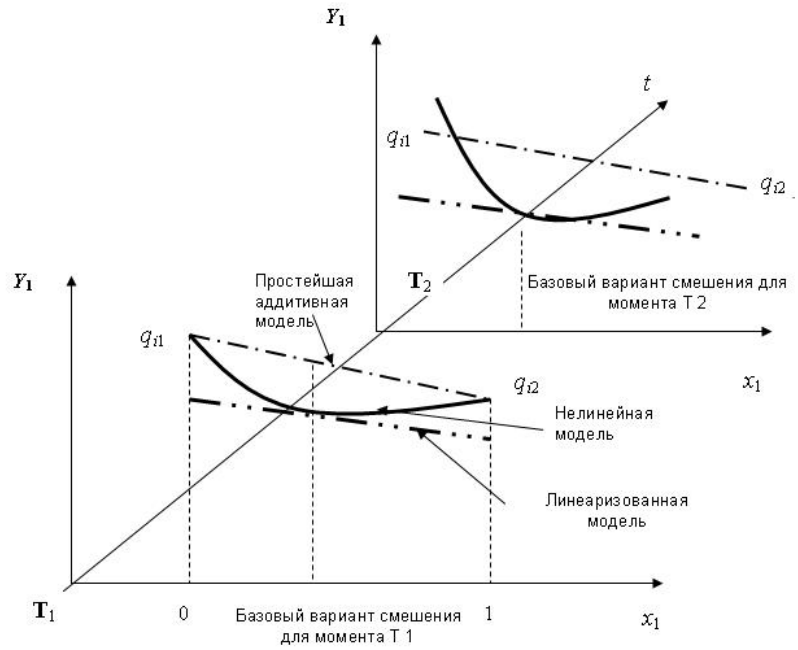


Рис. 2. Иллюстрация процесса компаундирования во времени на основе различных моделей

Схема применения модели (3) аналогична традиционным схемам, использующим линеаризацию и процедуры симплекс-метода, но требует более сложных математических подходов, связанных с задачей рестриктивной оптимизации. Одним из эффективных методов решения возникающих экстремальных задач с ограничениями типа равенств и неравенств является алгоритм Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника), основанный на локальной линеаризации и пошаговом применении симплекс-метода.

Структура программного комплекса управления смешением на основе данной модели показана на рис.3.

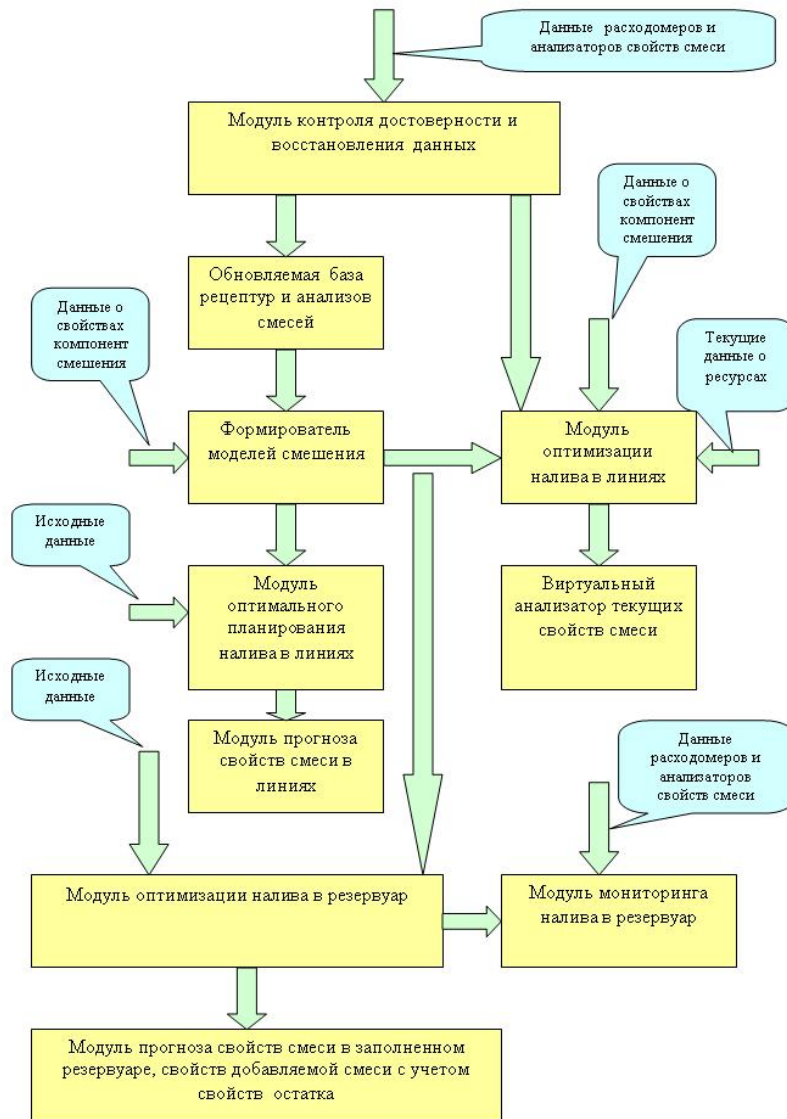


рис.3

3. Предварительный расчет оптимальных рецептов (оптимальное планирование налива по линиям)

Рецептура товарного продукта основывается на показателях качества имеющихся компонентов, требований ГОСТ и стандартов предприятия к физико-химическим свойствам отдельных марок товарных топлив и задании станции смешения на их производство. При этом для каждой партии продукции необходимо найти целесообразное и экономически выгодное соотношение компонентов.

Задача оптимизации компонентного состава топлива решается методами нелинейного программирования с учетом довольно большого набора ограничений, определяемых технологическими факторами и показателями качества выходного продукта. Например, количество ограничений для трех линий налива дизельного топлива (стандартного с содержанием серы до 0.2 %, малосернистого с содержанием серы менее 0.05 %, и зимнего) в виде равенств и неравенств достигает 100.

Для каждой из работающих линий налива задаются характеристики приготавливаемого топлива. Эти характеристики представляют собой матрицы, состоящие из нижних и верхних границ для каждого из контролируемых параметров. Для каждой из линий налива задаются ограничения на компоненты, которые допустимо использовать в данной линии налива.

Ограничения типа равенств относятся к базовым потокам и состоят в требовании полного использования этих потоков. Ограничения типа неравенств относятся к остальным возможным компонентам и отражают имеющиеся запасы и пропускную способность используемых трубопроводов.

Расчет оптимального плана налива является ориентировочным, поскольку условие неизменности расходов базовых потоков при заполнении товарного резервуара на практике чаще всего не выполняется. Отсюда возникает задача оптимального управления смешением в линиях налива в реальном времени. На рис. 4 показан пример фрагмента интерфейса вывода оптимального плана налива для двух линий налива дизельного топлива.

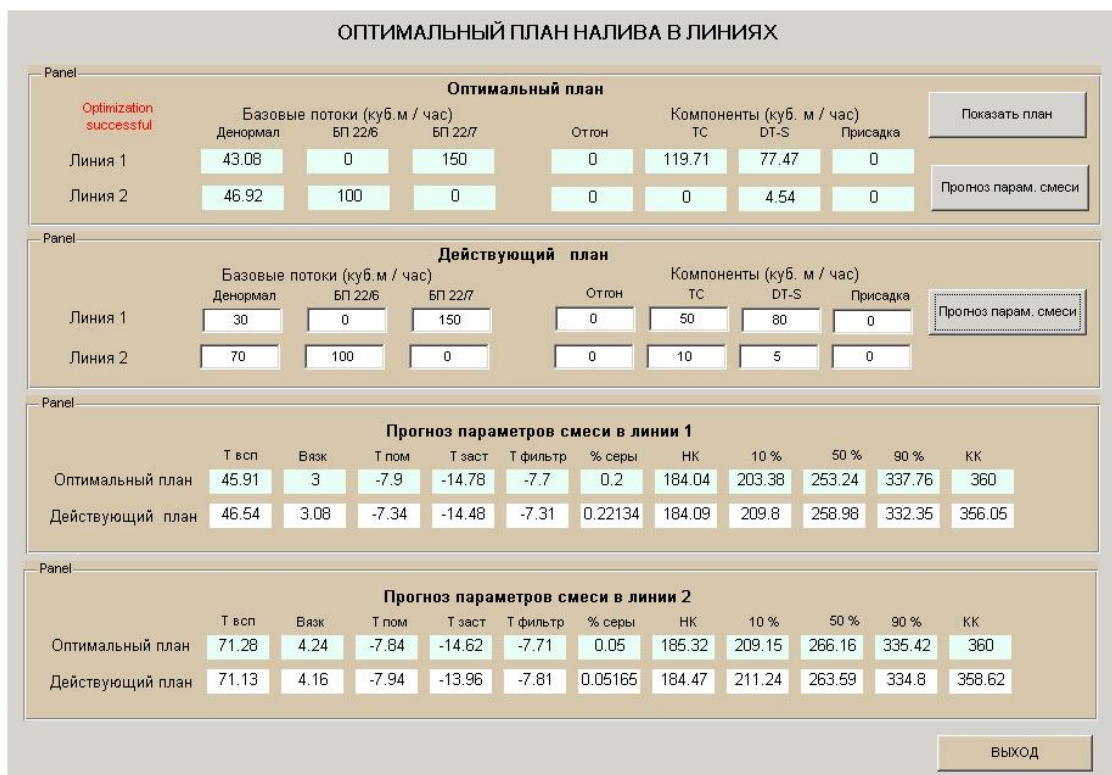


рис.4

4. Управление смешением в линиях налива

Наличие информации о свойствах и объемах (процентных соотношениях) использованных компонент смешения и товарного топлива позволяет восстановить методами регрессионного анализа набор многомерных поверхностей отклика. Указанные поверхности задаются соответствующими регрессионными коэффициентами и являются основой для построения виртуальных анализаторов [2], используемых для решения задач визуализации и поддержки управляющих решений, включающих в себя:

- прогнозирование свойств товарного топлива исходя из процентного соотношения и текущих свойств компонент смешения;

- оценивание качества сырья по результатам смешения и свойствам использованных компонент;
- формирование текущих оптимальных рецептур смешения и рекомендаций по корректирующему управлению.

Недостаточность или искаженность исходных данных приводят к погрешности восстановления функций отклика и, в конечном счете, к снижению качества формируемых управлений.

Следует отметить, что производство нефтепродуктов во многих ситуациях осуществляется в условиях значительного разброса параметров исходного сырья – сырой нефти. Указанное разнообразие нефтей, получаемых из разных скважин, приводит к необходимости адаптации промежуточных технологических процессов производства отдельных компонент, что еще более усиливает их дисперсионные характеристики. Дополнительную неопределенность в решении задачи компаундирования создает наличие некоторого разброса в массе поступающих на смешение компонент, обусловленного погрешностями исполнительных и измерительных устройств. В результате этого разброса параметров компонент даже строгое соблюдение соотношений рецептур не гарантирует выполнения условия пригодности, что приводит к необходимости введения существенного запаса по качеству и, как следствие, к снижению экономической эффективности производства.

В настоящее время при производстве товарных топлив в контуре управления смешением имеются поточные on-line анализаторы, определяющие показатели качества материальных потоков. Точность этих анализаторов не всегда удовлетворительна, кроме этого, они часто отключаются на профилактику. В связи с этим получаемые от них данные должны подвергаться проверке на достоверность и при необходимости восстанавливаться. Приходится также учитывать возможность возникновения скачкообразных и неконтролируемых изменений, обусловленных различными физическими причинами: отрывом накипи серы со стенок трубопровода, неполным закрытием перепускной коммутационной задвижки между трубопроводами, недостатком данных о выходной продукции систем первичной переработки нефти, ошибками операторов, техническими неисправностями исполнительных устройств и контрольно-измерительных средств и др.

Проблема управления смешением в линиях налива состоит в оптимальном (в смысле принятого критерия) распределении базовых потоков по линиям налива и регулировании расходов компонент смешения в каждой линии таким образом, чтобы выполнялись все установленные ограничения.

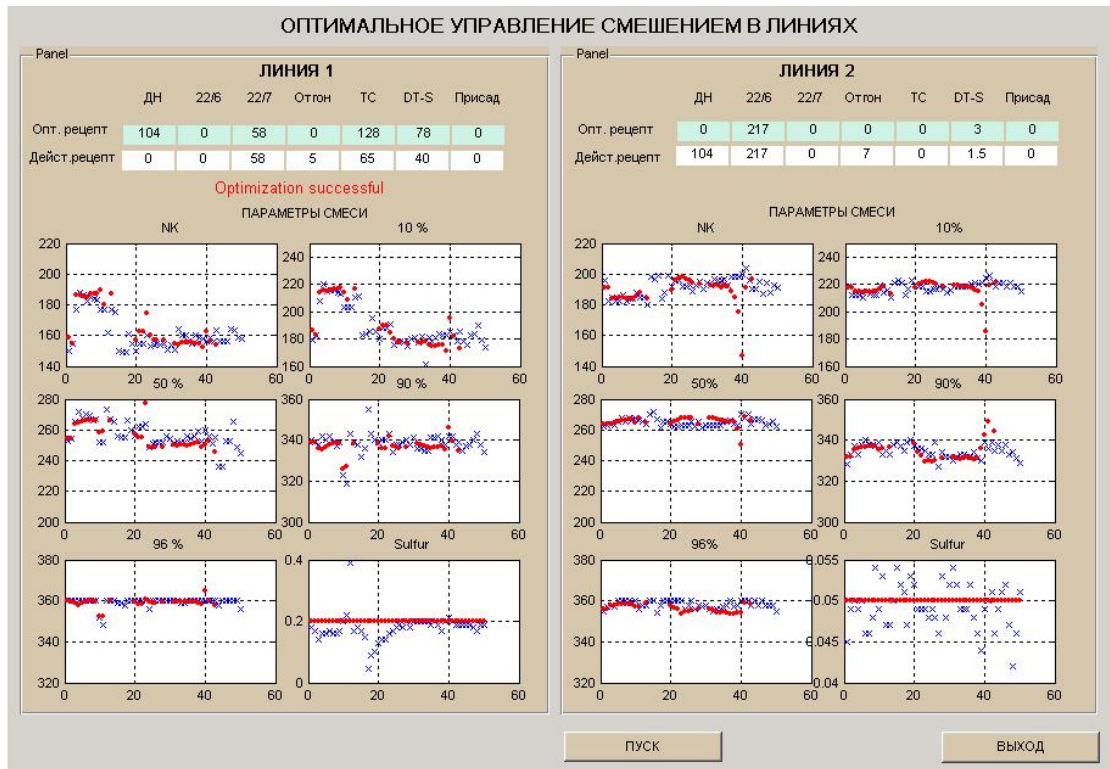


рис.5

На рис. 5 показан фрагмент интерфейса управления смешением в линиях получения дизельных топлив и оптимизацией по критерию минимума запаса по качеству. В данном случае критерием является минимум запаса по процентному содержанию серы в топливе. В качестве базовых потоков используются выходные потоки с установок гидроочистки и денормализат, в качестве компонентов смешения – керосин и сернистое дизельное топливо. Как видно из графиков интерфейса, стабильность свойств смеси при оптимальном управлении существенно выше (расчетные оптимальные значения обозначены точками, а реальные измерения обозначены крестиками). Кроме того, реальные измерения процентного содержания серы в обеих линиях налива при управлении оператором (без оптимизации) далеки от оптимальных значений. Более детальный анализ данного фрагмента (см. рис.6) показывает, что расход самой дешевой компоненты (сернистого дизтоплива) при оптимальном управлении может быть увеличен до 20%, что обеспечивает снижение себестоимости конечного продукта до 5 - 8 % при более стабильном его качестве.

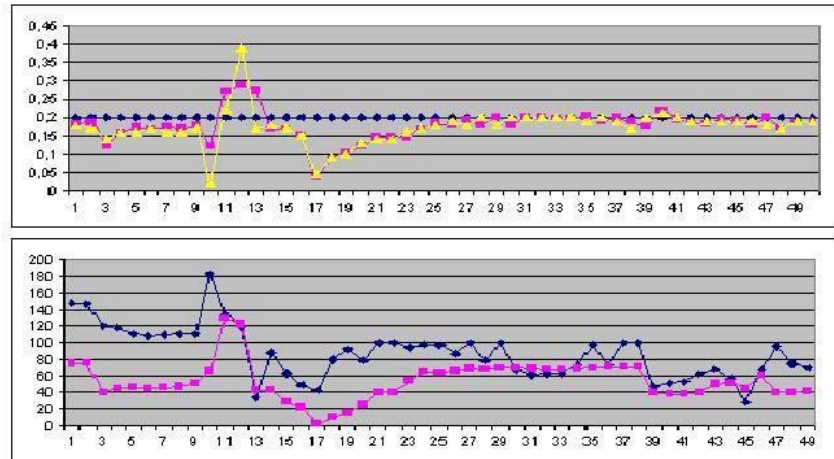


рис.6

Таким образом, оптимальное управление в линиях налива приводит к снижению себестоимости продукции, стабилизации свойств смеси в линиях налива и соответственно в товарном резервуаре, а также исключаются затраты на дополнительную перекачку и переработку смеси, которые возникают в случае получения в товарном резервуаре некондиционной продукции.

Система управления смешением в линиях может быть реализована в режиме «советчика» или в режиме автоматического многомерного регулятора качества смеси, т.е. в виде замкнутого контура многомерного регулирования, включающего анализаторы качества смеси.

5. Планирование, коррекция и мониторинг налива товарного резервуара

На практике выполнение соотношений предлагаемых рецептов предполагает наличие некоторого запаса по качеству $\delta y_r, \forall r=1, \dots, M$, т.е. $y_r^* + \delta y_r \in \Delta y_r, \forall r=1, \dots, M$.

Это связано с тем, что формируемые рецепты представляют собой некоторые усредненные решения, полученные путем статистической обработки данных предшествующей эксплуатации или в процессе априорных аналитических исследований физико-химических свойств различных смесей. В обоих случаях результат представляет собой некоторое статистическое усреднение, не в полной мере отражающее особенности конкретной реализации.

Одной из важных задач управления смешением является задача оптимизации наполнения товарного резервуара продукцией с заданным уровнем запаса по качеству. Постановка этой задачи состоит в следующем.

Задается масса и свойства остатка в резервуаре, при этом свойства остатка могут быть хуже товарных нормативов для данного резервуара или иметь

некоторый запас по качеству, который можно в результате налива добавляемой смеси снизить. Кроме этого, задаются нижние и верхние границы налива, на каждый момент времени фиксируется масса всех используемых компонентов, залитых в ходе варьирования рецептур и объемов потоков. Оптимизация в этом случае сводится к определению свойств суммарной смеси на конец процесса заполнения резервуара и определению свойств добавляемой смеси, с учетом того, что свойства смеси в резервуаре интегрируются – в соответствии с моделью смешения.

Таким образом, задача оптимального наполнения товарного резервуара состоит из двух частей:

- расчет свойств добавляемой в резервуар смеси с целью обеспечения в конце налива оптимальных свойств топлива;
- мониторинг процесса налива и, при необходимости, его коррекция.

На рис.7 показан фрагмент интерфейса для расчета плана и мониторинга процесса налива в товарный резервуар. После ввода данных об остатке в товарном резервуаре с помощью модели смешения производится расчет свойств добавляемой смеси и оценивание свойств топлива в конце процесса налива. Мониторинг реализуется в виде визуализации процесса наполнения и текущего контроля критических параметров смеси в резервуаре.

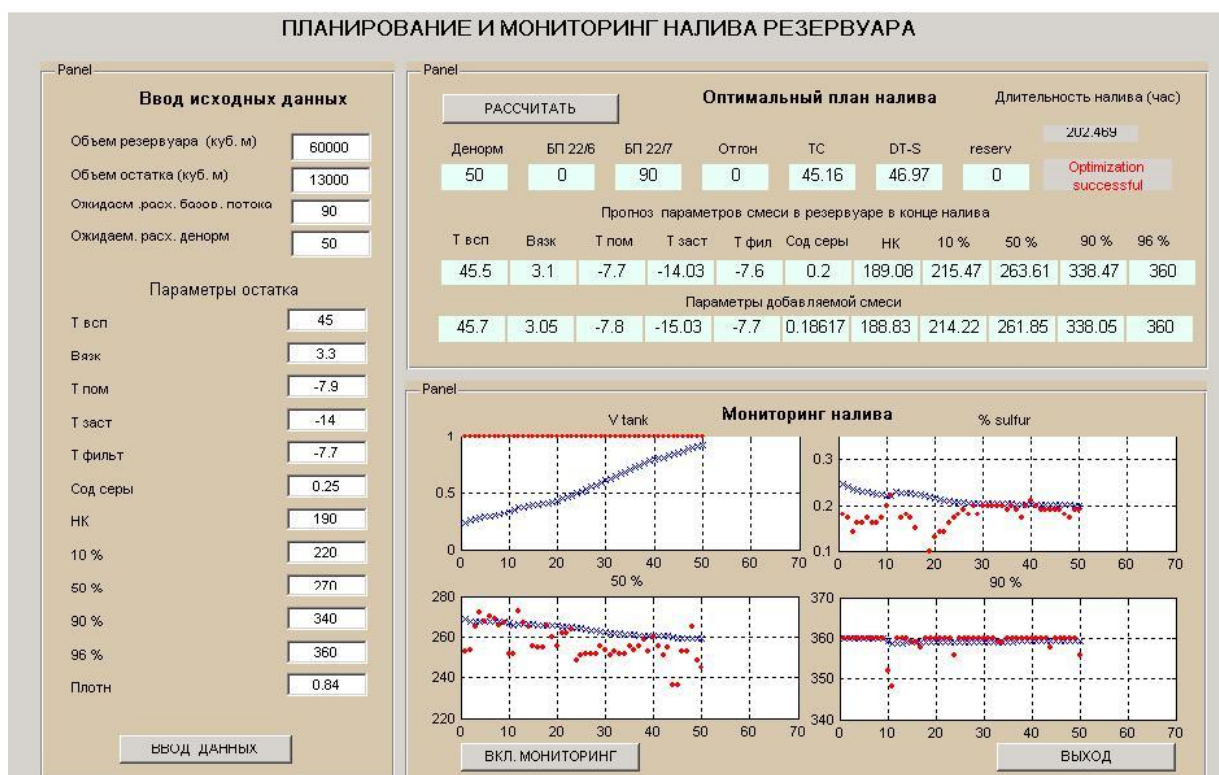


рис.7

На графиках интерфейса показаны:

- процесс заполнения топливом относительного объема резервуара;
- значения 50 % и 90 % точек выкипания топлива;
- текущее процентное содержание серы в топливе.

Точками на графиках обозначены параметры порций заливаемой смеси с линии налива (с интервалом 4 часа), а крестиками – интегрированные значения параметров смеси в товарном резервуаре.

Выводы

Предложенная динамическая модель для оценивания свойств углеводородных смесей с нелинейным взаимодействием компонентов смешения и разработанные на ее базе алгоритмы оптимального планирования и управления смешением позволяют:

- существенно снизить запас по качеству и, соответственно, себестоимость товарной продукции, при этом стабилизировать ее свойства;
- снизить издержки производства за счет исключения затрат на дополнительную перекачку из товарного резервуара некондиционной продукции;
- автоматизировать процесс управления технологическим процессом.

По данным зарубежных источников [3] на нефтеперегонном заводе мощностью около 16 тыс.м³/сут экономический эффект от работы всех систем смешения с использованием программы оптимизации превышает 3 млн.долл./год.

Литература

1. Гуреев А. А., Жоров Ю. М., Смидович Е. В. Производство высокооктановых бензинов. - М.: Химия, 1981. – 224 с.
2. Мусаев А. А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными ТП // Автоматизация в промышленности. – 2003, № 8. - С. 28-33.
3. Arwika K., Astrom T. Swedish refiner installs advanced blend control system // Oil and Gas Journal, 2003, № 11. — P. 60-62, 64-67

Перечень рисунков и подрисуночные подписи

Рис.1 Типовая схема компаундирования дизельных топлив в потоке

Рис.2 Иллюстрация процесса компаундирования во времени на основе различных моделей

Рис.3 Структура программного комплекса управления компаундированием

Рис.4 Интерфейс вывода оптимального плана налива по линиям

Рис.5 Фрагмент интерфейса управления смешением в линиях получения дизельных топлив

Рис.6 Анализ эффективности оптимального управления

(на верхнем графике горизонтальная линия на уровне 0,2 – процентное содержание серы в смеси по оптимальной рецептуре, вторая кривая – содержание серы в смеси по лабораторным анализам;
на нижнем графике – нижняя кривая – реальный расход дешевой компоненты сернистого дизельного топлива, верхняя кривая – рассчитанное ее значение при оптимальном управлении смешением)

Рис.7 Фрагмент интерфейса для расчета плана и мониторинга процесса налива в товарный резервуар