

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПАУНДИРОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ В ПОТОКЕ С НЕЛИНЕЙНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ КОМПОНЕНТОВ

В. А. НИКИТИН¹, А. А. МУСАЕВ²

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

¹<vnikitin@szma.com>, ²<amusaev@szma.com>

УДК 665.63:661.715

Никитин В. А., Мусаев А. А. Оптимизация компаундирования углеводородных смесей в потоке с нелинейным взаимодействием компонентов // Труды СПИИРАН. Вып. 4. — СПб.: Наука, 2007.

Аннотация. Предложена динамическая модель для оценивания свойств аддитивных смесей с нелинейным взаимодействием компонентов смешения. На базе модели разработаны алгоритмы улучшенного планирования процесса смешения в потоке в линиях налива топлив с различными характеристиками, алгоритмы оптимального управления смешением в линиях налива в реальном времени и алгоритмы контроля наполнения топливного резервуара. Работоспособность соответствующих алгоритмов апробирована на примере задачи оптимизации управления технологическим процессом компаундирования дизельного топлива в потоке. — Библ. 7 назв.

UDC 665.63:661.715

Nikitin V. A., Musayev A. A. Optimizing the compounding process of hydrocarbon mixtures in the flow with nonlinear interaction of components // SPIIRAS Proceedings. Issue 4. — SPb.: Nauka, 2007.

Abstract. This article proposing the dynamic model for evaluating the properties of additive mixtures with nonlinear interactions between components. The model-based algorithms improved planning process mixing in the flow lines in filling fuels with different characteristics, optimal control algorithms mixing in the lines filling in real-time control algorithms and filling the fuel tank. The operability of appropriated algorithms is tested by the optimization task for technology flow control for diesel fuel compounding on the flow. — Bibl.7 items.

1. Постановка задачи

Задача оптимизации процесса компаундирования углеводородных смесей относится к классу задач APC (Advanced Proceed Control) управления и решается с помощью известных алгоритмов оптимизации [1–2, 4–5].

На практике решение данной задачи связано с целым рядом проблем, существенно усложняющих процедуру поиска решения. В частности, технология компаундирования товарных топлив требует учета большого числа взаимосвязанных переменных, параметры которых образуют многомерный нелинейный процесс с нестационарными шумами состояния и наблюдений. Дополнительные сложности возникают при решении данной задачи в динамическом режиме, когда смешение осуществляется в потоке одновременно на нескольких технологических линиях с ограничениями по запасам сырьевых компонентов. Упрощенная технологическая схема поточного компаундирования товарного топлива на трех линиях налива показана на рис. 1.

При использовании линеаризованной 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 компаундирова-

ния 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 [2]. В частности, 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.

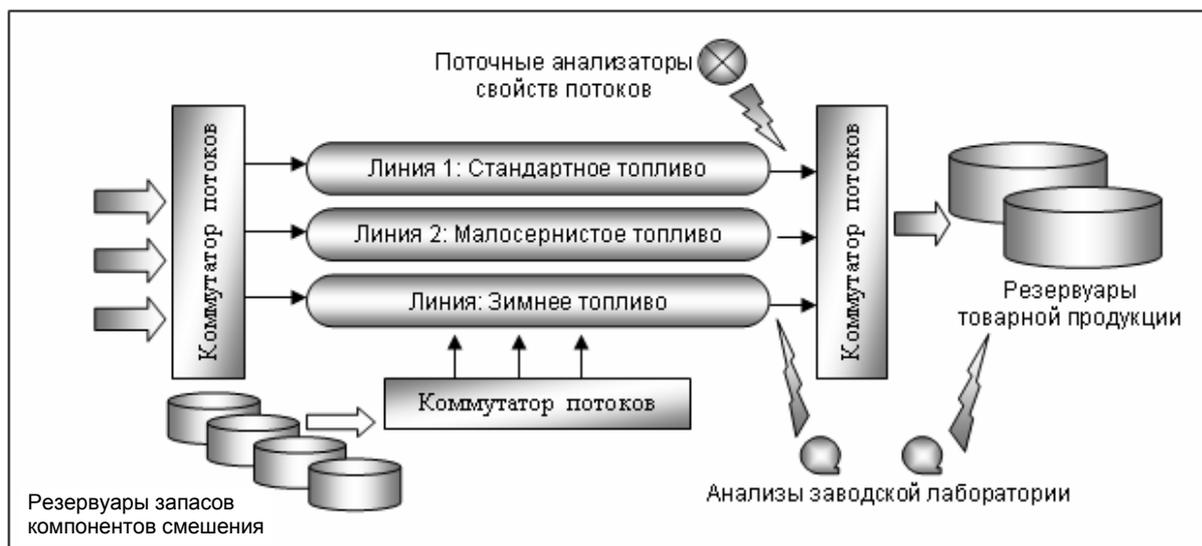


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема поточного компаундирования товарного топлива на трех линиях налива.

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

В традиционных статических системах управления компаундированием 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. Дополнительные сложности создает тот факт, что специфика технологического цикла не позволяет оператору регулировать базовый поток сырья.

В настоящей статье рассматривается динамическая (поточная) схема смешения, связанная с решением таких основных задач управления этим процессом, как:

- оптимальное планирование налива по трем технологическим линиям для заданных базовых потоков с 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;
- планирование, коррекция и мониторинг налива резервуара выходной продукции с учетом свойств не слитого остатка.

Модель смешения позволяет априорно формировать компонентный состав смеси для получения выходной продукции с заданными свойствами. На практике эта задача осложняется наличием нескольких уровней неопределенности, наиболее существенный из которых связан со значительным разбросом свойств поступающих компонентов смешения, различной дискретностью измерений параметров и неполнотой мониторинга состояния технологического процесса. Наличие неопределенности приводит к необходимости использования схем виртуального анализа качественных характеристик смеси и последовательной коррекции процесса.

Целевой функцией процедуры оптимизации, как правило, является функция от себестоимостей расходов компонентов (например, итоговая себестоимость смеси), непосредственно связанная со свойствами товарной продукции. В приведенной ниже постановке в качестве целевой функции используется массовая доля относительно дешевого сернистого компонента, которая подлежит максимизации в заданных пределах. Задача решается в условиях априорных 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-химические показатели), имеющих одинаковую значимость. Обозначим численные значения i -го свойства смеси через y_i , а его идеальное значение через y_i^0 , $i = 1, \dots, M$. Тот же показатель j -го базового компонента обозначим через q_{ij} , $j = 1, \dots, N$. Пусть массовые доли j -го компонента в смеси x_j : $0 \leq x_j \leq 1$, отвечают требованию нормировки

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

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 $y = [y_1, \dots, y_M]^T$, $y^0 = [y_1^0, \dots, y_M^0]^T$, $x = [x_1, \dots, x_N]^T$ 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 [2] 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 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

$$A = F(C_w, Q_w, \text{cov}(C_w), \text{cov}(Q_w), \text{cov}(C_w, Q_w), W, t),$$

где cov — оператор вычисления ковариационной матрицы C_w — матрица рецептур в окне данных W ; Q_w — матрица свойств компонентов в W , основан на нелинейной идентификационной модели процесса смешения с использованием канонических корреляций входных и выходных параметров. При этом данные измерителей расхода компонентов и анализаторов свойств смеси обрабатываются на скользящем окне данных W . Соответственно свойства смеси y определяются выражением

$$y = Q_w \times A \times x. \quad (3)$$

Использование канонической корреляции позволяет извлечь более полную информацию из значений расходов компонентов и анализов полученной смеси, поскольку таким образом учитываются взаимосвязи выходных параметров. При этом точность прогноза свойств смеси находится в пределах 0,6–3%.

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. 2.

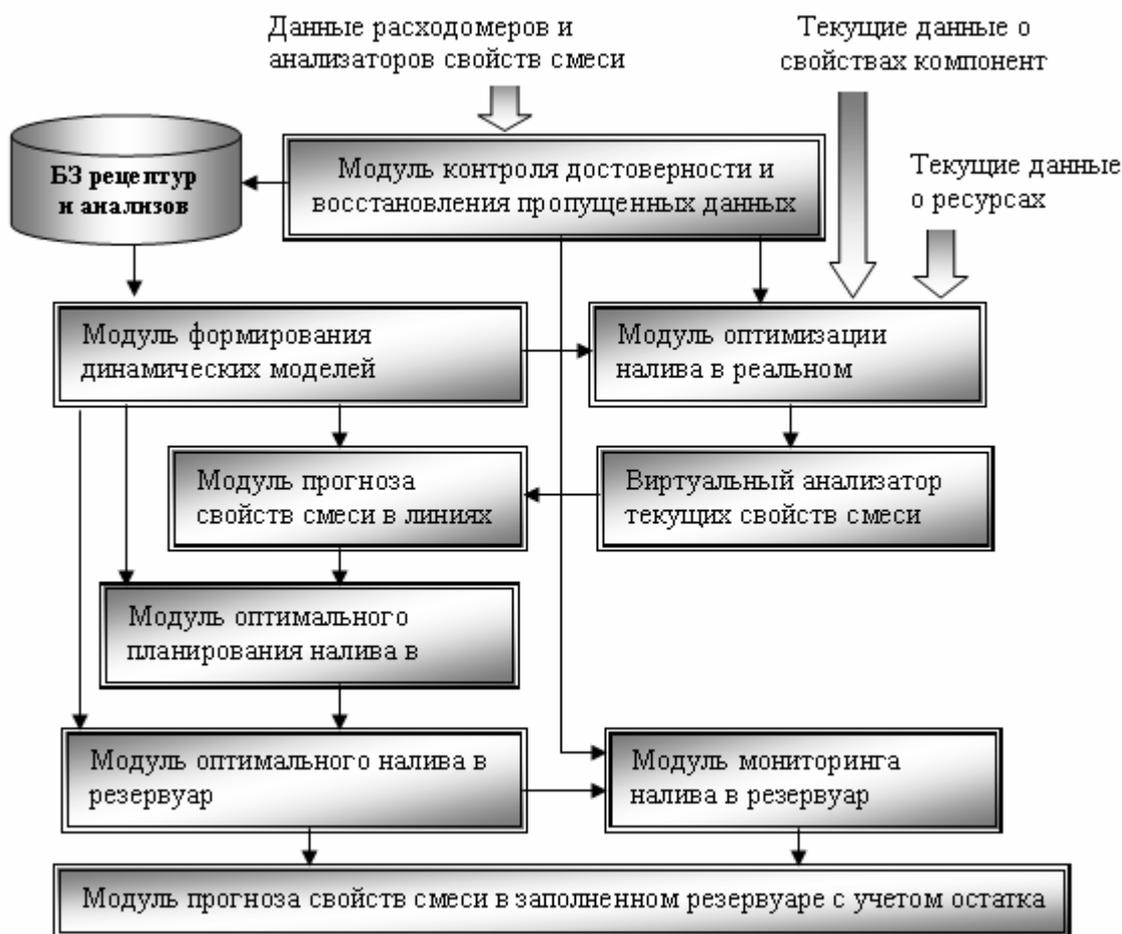


Рис. 2. Упрощенная технологическая схема поточного компаундирования товарного топлива на трех линиях налива.

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

Рецептура товарного продукта основывается на показателях качества имеющихся компонентов и требованиях ГОСТа к физико-химическим свойствам отдельных марок товарных топлива [3]. При этом для каждой партии 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, малосернистого с содержанием серы менее 0,05% и зимнего) в виде равенств и неравенств составляет порядка 100.

Для каждой из работающих линий налива задаются характеристики приготавливаемого топлива. Эти характеристики записываются в форме матрицы, включающей в себя значения нижних и верхних границ для каждого из контролируемых параметров. Часть границ устанавливается в соответствии с ГОСТ [3], остальные формируются на основании стандартов предприятия. 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.

4. Управление смешением в линиях налива

Наличие информации, отображающей свойства и объемы (процентные соотношения) использованных компонентов смешения и получаемого товарного топлива, позволяет восстановить методами регрессионного анализа набор многомерных поверхностей отклика. Указанные поверхности задаются соответствующими регрессионными коэффициентами и являются основой для построения виртуальных анализаторов [6], используемых для решения задач визуализации и поддержки управляющих решений, включающих в себя:

- прогнозирование свойств товарного топлива, исходя из процентного соотношения и текущих свойств компонентов смешения;
- оценивание качества сырья по результатам смешения и свойствам использованных компонентов;
- 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 компонентов, что еще более усиливает их дисперсионные характеристики. Дополнительную неопределенность в решении задачи компаундирования создает наличие некоторого разброса в массе поступающих на смешение компонентов, обусловленного погрешностями исполнительных и измерительных устройств. В результате этого разброса параметров компонентов даже строгое соблюдение соотношений рецептур не гарантирует выполнения условия пригодности выходной продукции, 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 используются поточные on-line анализаторы, определяющие показатели качества материальных потоков. Точность этих анализаторов не всегда удовлетворительна. В связи с этим получаемые от них данные должны подвергаться проверке на достоверность и при необходимости восстанавливаться. Приходится также учитывать возможность появления скачкообразных и неконтролируемых систематических изменений, обусловленных различными физическими причинами: отрывом накипи серы со стенок трубопровода, неполным закрытием перепускной коммутационной задвижки между трубопроводами, недостатком данных по 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 установленного критерия) распределении базовых потоков по линиям налива и регулировании расходов компонентов смешения в каждой линии таким образом, чтобы выполнялись все установленные ограничения, включая ограничения на свойства смеси. Критерием оптимизации чаще всего является максимум процентного содержания серы в топливе с учетом имеющегося ограничения по данному показателю товарной продукции (что практически эквивалентно минимуму себестоимости продукции). В качестве базовых потоков используются потоки с установок гидроочистки и денормализат. Другими компонентами смешения являются керосин и сернистое дизельное топливо.

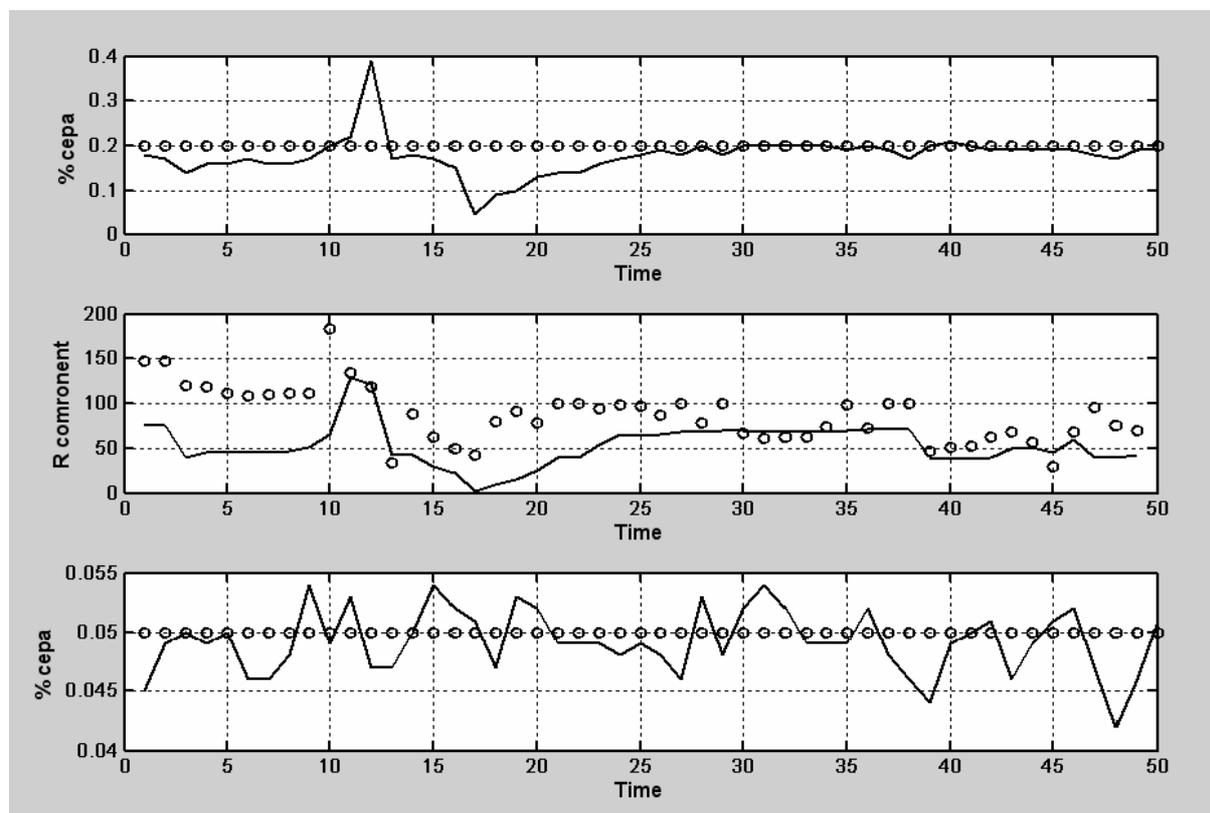


Рис. 3. Результаты оптимального управления компаундированием в потоке дизельного топлива.

На рис. 3 представлены результаты моделирования оптимального управления компаундированием в потоке дизельного топлива (временные отсчеты взяты через 4 часа). На верхнем графике рис. 3 сплошной линией показаны значения измеренной массовой доли серы в топливе (в процентах) при управлении процессом смешения оператором; кружками показана массовая доля серы в топливе при оптимальной рецептуре смеси и управлении процессом модулем управления на основе прогностической модели.

На графике в средней части рис. 3 сплошной линией показан реальный расход ($\text{м}^3/\text{час}$) самого дешевого компонента топлива при управлении процессом смешения оператором, а кружками — рассчитанные значения расхода дешевого компонента топлива при оптимальном управлении процессом с прогностической моделью (при этом устраняется избыточный запас качества ди-

зельного топлива, стабилизируются его параметры и снижается его себестоимость).

На графике в нижней части рис. 3 показаны результаты сравнения управления в линии налива малосернистого топлива оператором (сплошная линия) и модулем с прогностической моделью (кружки).

Таким образом, реальные измерения процентного содержания серы в обеих линиях налива при управлении оператором (без оптимизации) далеки от оптимальных значений. Более детальный анализ данного фрагмента показывает, что расход самого дешевого компонента (сернистое дизельное топливо) при оптимальном управлении может быть увеличен до 20%, что и обеспечивает существенное снижение себестоимости конечного продукта.

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

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

5. Планирование, коррекция и мониторинг налива товарного резервуара

На практике выполнение соотношений предлагаемых рецептур предполагает наличие некоторого запаса по качеству продукции. Это связано с тем, что формируемые рецептуры 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 заполнения товарного резервуара выходной продукцией с заданным уровнем запаса по качеству. Постановка этой задачи состоит в следующем.

Задаются 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:

- расчета свойств добавляемой в резервуар смеси с целью обеспечения в конце налива оптимальных свойств топлива;
- мониторинга процесса налива и при необходимости его коррекции.

На рис. 4 показаны результаты управления программным модулем содержанием (массовая доля) серы в товарном резервуаре в процессе налива дизельного топлива, обеспечивая в конце процесса заданное ее значение 0,2% при условии, что в начале налива в резервуаре был остаток смеси со значением этого параметра 0,245%.

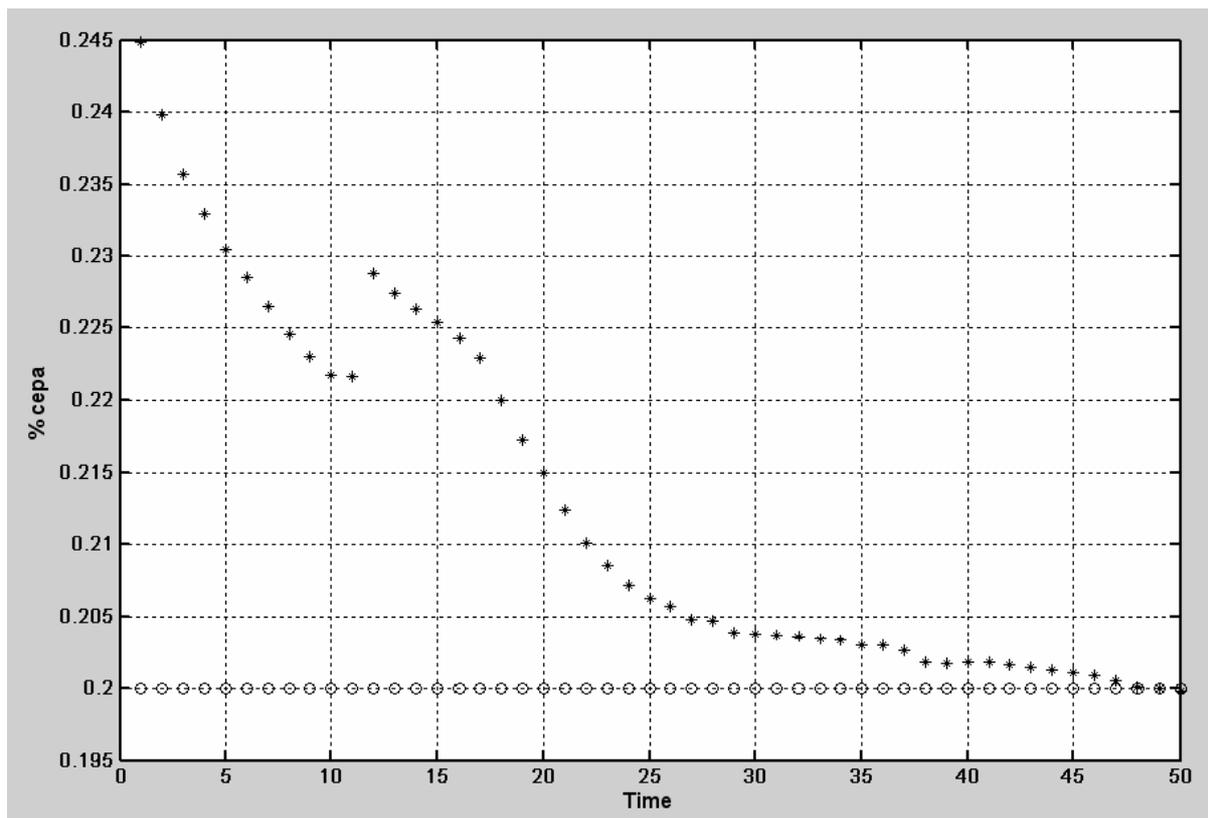


Рис. 4. Результаты оптимального управления наливом товарного резервуара.

После ввода данных свойств остатка в программный модуль с помощью модели смешения производится непрерывный расчет свойств добавляемой смеси и оценивание свойств топлива в конце процесса налива. Мониторинг реализуется в виде отображения процесса наполнения и текущего контроля других критических параметров смеси в резервуаре.

6. Выводы

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

- существенно снизить запас по качеству (до 20%) и соответственно себестоимость товарной продукции (до 5-7%), 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 [7] на нефтеперегонном заводе мощностью около 16 тыс. м³/сут экономический эффект от работы систем смешения с использованием программы оптимизации превышает 3 млн. долл./год.

Литература

- [1] *Вершинин В. И., Симанчев Р. Ю.* Расчет состава смесей с заданным набором свойств // Вестник Омского ун-та. 1988. № 4. С. 37–41.
- [2] *Гуреев А. А., Жоров Ю. М., Смидович Е. В.* Производство высокооктановых бензинов. М.: Химия, 1981. 224 с.
- [3] ГОСТ 305-82* (уточненный в 2000 г.). Топливо дизельное. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1995. 8 с.
- [4] *Залищевский Г. Д., Поздьяев В. В., Лисицын Н. В., Кузичкин Н. В.* Оптимальное компаундирование дизельных топлив // Нефтепереработка и нефтехимия. 2002. № 4. С. 10–14.
- [5] *Медич Дж.* Статистические оптимальные линейные оценки и управление (пер. с англ. под ред. А. С. Шаталова). М.: Энергия, 1973. 439 с.
- [6] *Мусаев А. А.* Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными ТП // Автоматизация в промышленности. 2003. № 8. С. 28–14.
- [7] *Arwika K., Astrom T.* Swedish refiner installs advanced blend control system // Oil and Gas Journal. 2003. № 11. P. 60–67