

А.А. МУСАЕВ, д-р техн. наук, профессор,
В.А. НИКИТИН, канд. техн. наук, доцент

Оптимальное управление процессом смешения товарного топлива в потоке

Предложена прогностическая модель для оценивания свойств аддитивных смесей с нелинейным взаимодействием компонентов смешения. На базе модели были разработаны: алгоритм оптимального планирования процесса смешения в потоке; алгоритм оптимального управления смешением в линиях налива в РВ; алгоритм управления наполнением товарного резервуара.

The prognosis model for properties estimation of additive mixes with nonlinear interaction of components is offered. On the basis of this model the following algorithms has been worked out: the improved planning algorithm of mixture process in a stream; the optimum control algorithm of mixture in output lines in real time and the control algorithm of fuel tank filling.

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...4]. Однако, на практике решение данной задачи связано с целым рядом проблем. В частности, технология смешения товарного топлива требует учета большого количества 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 компонент. Упрощенная технологическая схема поточного смешения 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 оптимизации допущение

о линейности процесса смешения 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]. Изменение общего объема результата смешения (по сравнению с простой суммой объемов смешиваемых компонентов) свидетельствует о наличии существенных межмолекулярных взаимодействий. При этом степень уменьшения объема зависит от температуры компонент и среды взаимодействия. Наличие нелинейных эффектов приводит к необходимости использования более сложных математических подходов, связанных с методологией *рестриктивной оптимизации*.

В традиционных статических системах управления смешением 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 смешения 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 следующих основных задач управления:

- планирование оптимального налива по трем технологическим линиям для заданных базовых потоков

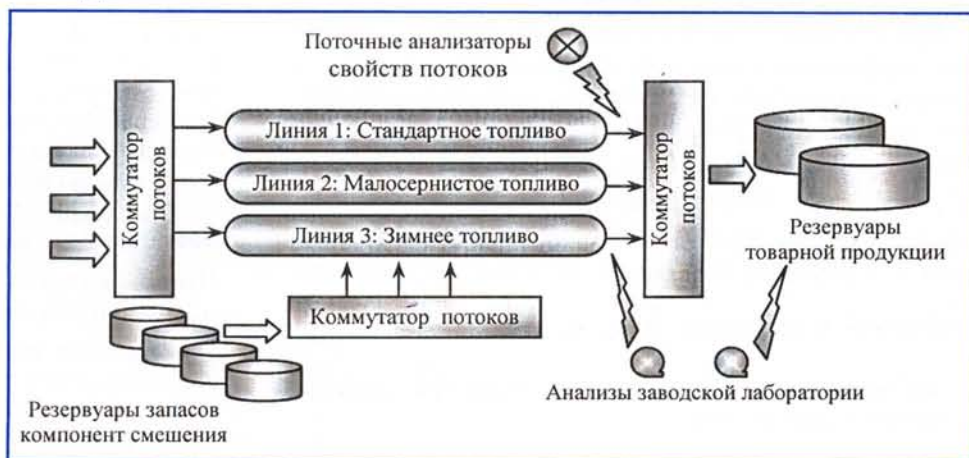


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема поточного смешения товарного топлива на трех линиях налива

с учетом запасов компонентов смешения (расчет оптимальных рецептов в линиях налива по заданным критериям);

- оптимальное управление расходами компонент в линиях смешения в РВ и реализация виртуального анализа свойств смеси для произвольного момента времени;

- планирование, коррекция свойств смеси и мониторинг налива товарного резервуара с учетом свойств не слитого остатка.

В основу решения поставленных задач положена MPC (*model predictive control*) технология оптимизации управления. Соответствующая ей прогностическая модель управления смешением 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 периодичностью измерений параметров и неполнотой мониторинга состояния ТП. Наличие неопределенности приводит к необходимости использования виртуального анализа качественных характеристик смеси и последовательной коррекции процесса. При этом в основе построения схем анализа, прогнозирования и оптимизации использовались модификации модулей программно-алгоритмического комплекса "Матрица", описанного в работе [5].

Целевой функцией процедуры оптимизации, как правило, является функция от себестоимостей компонентов (например, итоговая себестоимость смеси), непосредственно связанная со свойствами товарной продукции. В данной статье 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.

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_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 выражение для y_i 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 компонент.

Алгоритм получения матрицы A основан на нелинейной идентификационной модели процесса смешения с использованием канонических корреляций входных и выходных параметров. При этом данные измерителей расхода компонент и анализаторов свойств смеси обрабатываются на скользящем окне данных W . Общий вид алгоритма может быть представлен выражением:

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

где cov – оператор вычисления ковариационной матрицы параметров компонент; C_w – матрица рецептов в окне данных величиной W ; Q_w – матрица свойств компонентов в 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 компонент и анализов полученной смеси, поскольку этот метод позволяет учитывать взаимосвязи выходных параметров. При этом точность прогноза свойств смеси находится в пределах 0,6 ... 3 %.

Схема применения модели (3) аналогична традиционным схемам, использующим линейризацию 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 линейризации и пошаговом применении симплекс-метода.

Структура программного комплекса управления смешением на основе данной модели показана на рис. 2.

Предварительный расчет оптимальных рецептов (оптимальное планирование налива по линиям)

Рецептура товарного продукта основывается на показателях качества имеющихся компонентов и требований *ГОСТ* к физико-химическим свойствам отдельных марок товарного топлива [6]. При этом для каждой партии необходимо найти целесообразное и экономически выгодное соотношение компонентов.



Рис. 2. Структура программного комплекса оптимизации управления смешением

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 менее 0,2 %, 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 [6], 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 РВ. На рис. 3 показан фрагмент интерфейса вывода оптимального плана налива дизельного топлива для технологических линий получения стандартного и малосернистого топлива.

Управление смешением в линиях налива

Наличие информации, отображающей свойства и объемы (процентные соотношения) использованных компонент 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 [7], 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 смеси, зависящей от свойств использованных компонент, при этом целесообразно воспользоваться методами сжатия многомерных данных анализов свойств смеси [8];
- формирование текущих оптимальных рецептов смешения и рекомендаций по корректирующему управлению.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПЛАН НАЛИВА В ЛИНИЯХ											
Panel	Оптимальный план										
Optimization successful	Базовые потоки (куб. м / час)			Отклон	Компоненты (куб. м / час)			Показать план			
	Денормал	БП 226	БП 227		ТС	DT-S	Присадка				
Линия 1	43.08	0	150	0	119.71	77.47	0				
Линия 2	46.92	100	0	0	0	4.54	0	Прогноз парам. смеси			
Panel	Действующий план										
	Базовые потоки (куб. м / час)			Отклон	Компоненты (куб. м / час)			Прогноз парам. смеси			
	Денормал	БП 226	БП 227		ТС	DT-S	Присадка				
Линия 1	30	0	100	0	50	50	0				
Линия 2	70	100	0	0	10	5	0				
Panel	Прогноз параметров смеси в линии 1										
	T исп	Вязк	T пом	T эст	T фильтр	% серы	НК	10 %	50 %	90 %	КК
Оптимальный план	45.91	3	-7.9	-14.78	-7.7	0.2	184.04	203.38	253.24	337.76	360
Действующий план	46.54	3.08	-7.34	-14.48	-7.31	0.20170	174.2	202.17	260.06	337.3	359.12
Panel	Прогноз параметров смеси в линии 2										
	T исп	Вязк	T пом	T эст	T фильтр	% серы	НК	10 %	50 %	90 %	КК
Оптимальный план	71.28	4.24	-7.84	-14.62	-7.71	0.05	185.32	209.15	266.16	335.42	360
Действующий план	71.13	4.16	-7.94	-13.96	-7.81	0.05165	184.47	211.24	263.59	334.8	358.62

Рис. 3. Интерфейс вывода оптимального плана налива по линиям

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 нефти, получаемой из разных скважин, приводит к необходимости адаптации промежуточных ТП производства отдельных компонент, что еще более усиливает их дисперсионные характеристики. Дополнительную неопределенность в решении задачи смешения создает наличие некоторого разброса в массе поступающих на смешение компонент, обусловленного погрешностями исполнительных и измерительных устройств. В результате разброса параметров компонент даже строгое соблюдение соотношений рецептов 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, к тому же 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 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.

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

На рис. 4 показан фрагмент интерфейса управления смешением в линиях компаундирования дизельного топлива с оптимизацией по критерию минимума запаса по качеству, где по оси абсцисс даны номера отсчетов времени через каждые 4 часа.

В данном случае в роли такого критерия выступает максимизация процентного содержания серы в топливе с учетом имеющегося ограничения по данному показателю товарной продукции. В качестве базовых потоков

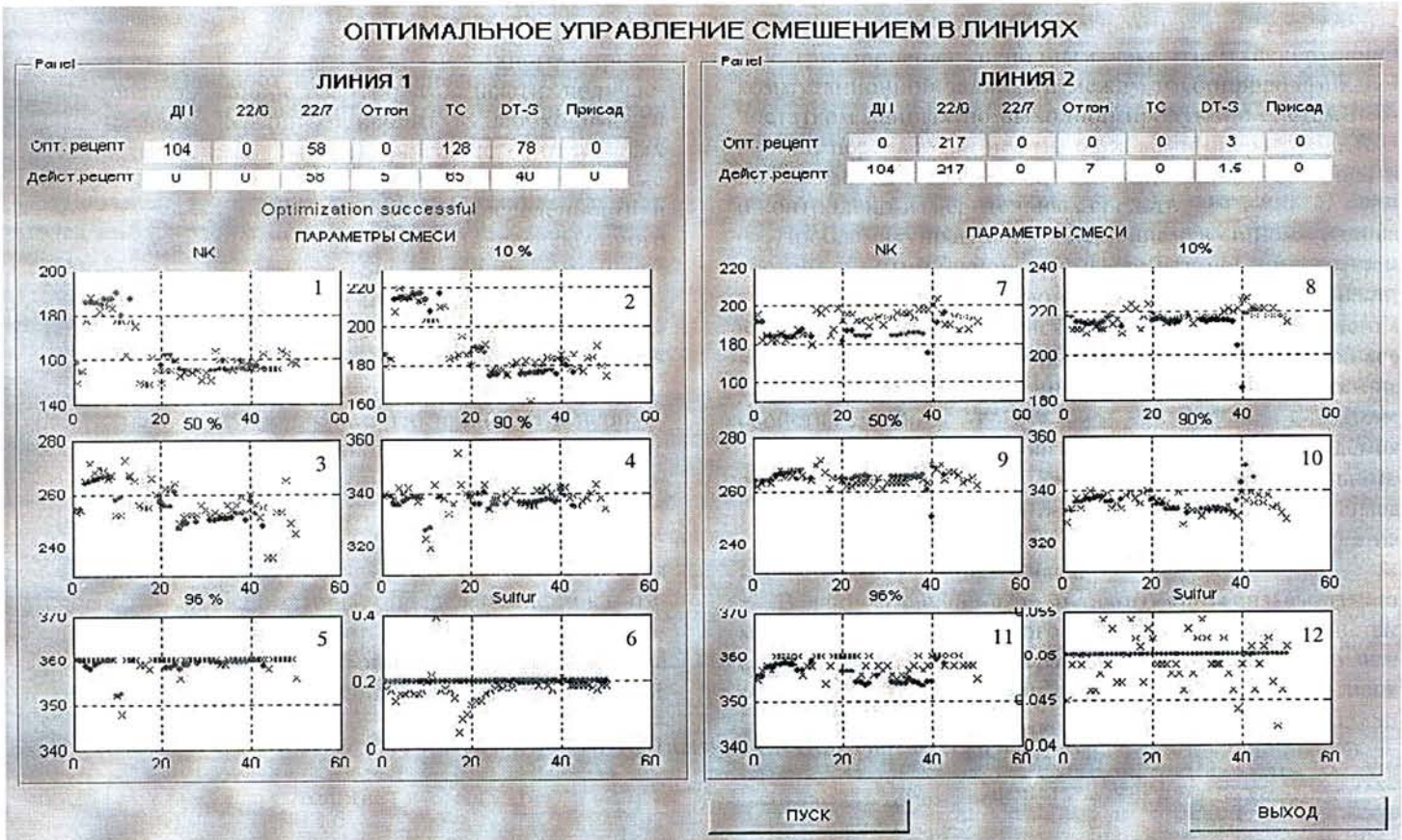


Рис. 4. Фрагмент интерфейса управления смешением в линиях компаундирования дизельного топлива. В верхней части рисунка – окна данных для оптимальной и действующей рецептуры смеси на данный момент времени. На графиках 1-5 параметры стандартного дизельного топлива в линии смешения (температуры: начала кипения, 10%, 50%, 90% и 96 % точки выкипания). На графике 6 – процентное массовое содержание серы в стандартном топливе. На графиках 7-11 параметры малосернистого дизельного топлива (температуры начала кипения, 10%, 50%, 90% и 96 % точки выкипания). На графике 12 – процентное массовое содержание серы в малосернистом топливе

используются потоки с установок гидроочистки и денормализат. Другими компонентами смешения являются керосин и сернистое дизельное топливо. На рис. 4 хорошо видно, что 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 (рис. 5) показывает, что расход самой дешевой компоненты (сернистого дизельного топлива) 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 режиме "советчика" или в режиме автоматического многомерного регулятора качества смеси, т.е. в виде замкнутого контура регулирования, включающего в себя анализаторы качества товарной продукции.

Планирование, коррекция и мониторинг налива товарного резервуара

На практике выполнение соотношений предлагаемых рецептов предполагает наличие некоторого избыточного запаса по качеству конечного продукта.

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 заполнения товарного резервуара выходной 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 снизить в результате налива добавляемой смеси. Кроме этого, задаются нижние и верхние границы налива, на каждый момент времени фиксируется масса всех используемых компонентов, залитых в ходе варьирования рецептов и объемов

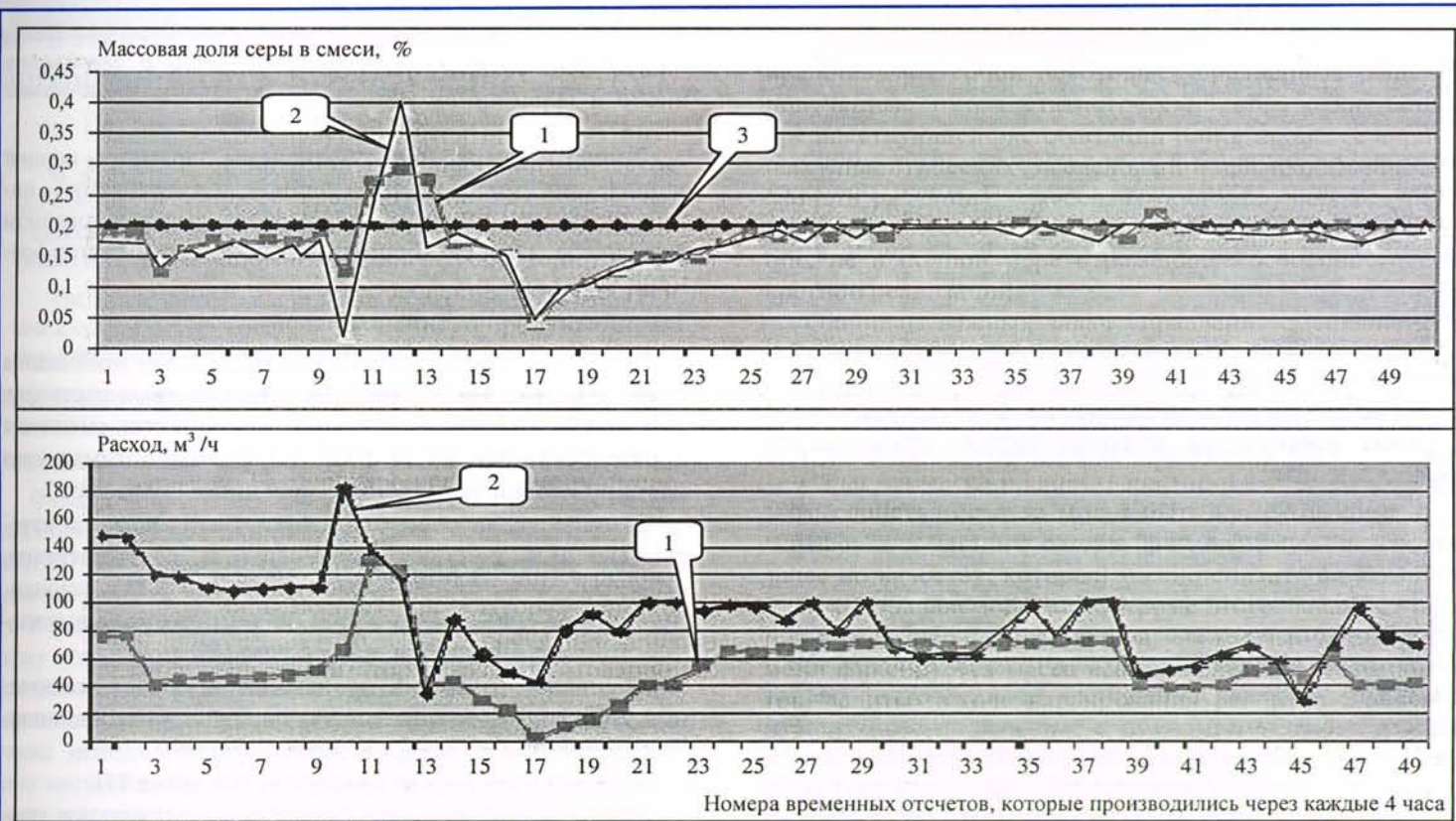


Рис. 5. Результаты оптимального управления компаундированием в потоке дизельного топлива. Верхний график: 1 – прогноз массовой доли серы в топливе (в %) при управлении процессом смешения оператором; 2 – измеренная массовая доля серы в топливе (в %) при управлении процессом смешения оператором; 3 – массовая доля серы в топливе при оптимальной рецептуре смеси (в %) и управлении процессом модулем на основе прогностической модели. Нижний график: 1 – реальный расход (m^3/h) дешевой компоненты топлива при управлении процессом смешения оператором; 2 – рассчитанное значение расхода дешевой компоненты топлива при оптимальном управлении процессом с прогностической моделью (при этом устраняется избыточный запас качества, стабилизируются параметры и снижается себестоимость дизельного топлива)

ПЛАНИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ НАЛИВА РЕЗЕРВУАРА

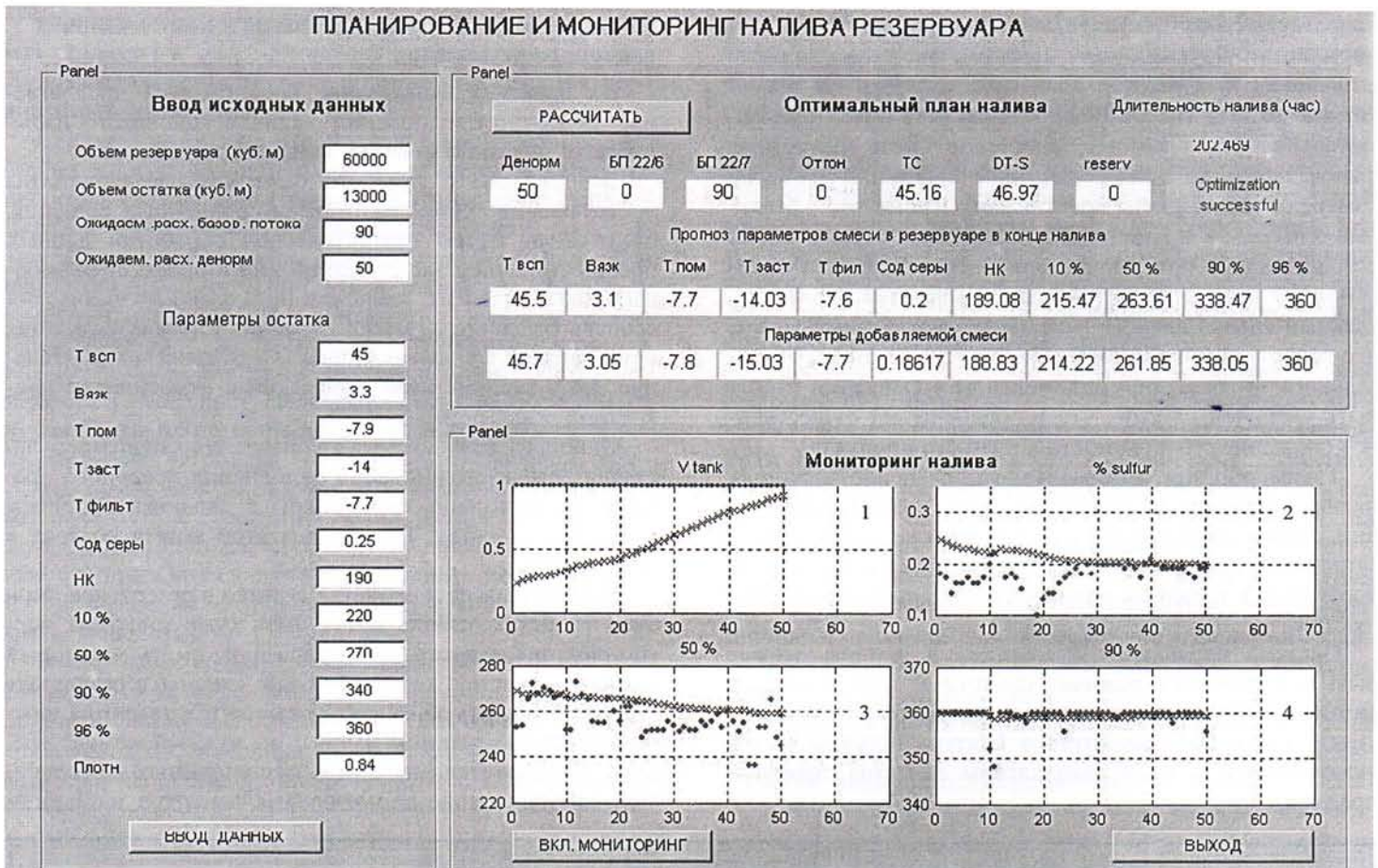


Рис. 6. Интерфейс модуля расчета плана оптимального налива товарного резервуара и мониторинга процесса. В левой части рисунка – ввод значений параметров остатка в резервуаре. В верхней части рисунка: данные плана оптимального налива резервуара; прогноз свойств смеси в резервуаре в конце налива; данные расчета свойств добавляемой смеси

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 в виде изменения расходов компонент смешения.

На рис. 6 показан фрагмент интерфейса для расчета 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.

На графиках рис. 6 показаны:

- 1 – относительный уровень топлива в резервуаре;
- 2 – изменение массовой процентной доли серы в топливе;
- 3, 4 – изменение температуры 50% и 90% точек выкипания смеси в резервуаре.

Точками на графиках обозначены параметры порций заливаемой смеси с линии налива, а крестиками – интегрированные значения параметров смеси в товарном резервуаре. По оси абсцисс даны номера отсчетов времени через каждые 4 часа.

Заключение

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 избыточный запас по качеству (до 20 % по содержанию серы) и, соответственно, себестоимость товарной продукции (до 5 %), стабилизировать ее свойства (разброс по температурам выкипания топлива снижается в 3...4 раза [8]);
- снизить издержки производства за счет исключения затрат на дополнительную перекачку некондиционной продукции из товарного резервуара;
- автоматизировать процесс управления ТП.

Работоспособность рассмотренных алгоритмов проверена на примере задачи оптимизации управления ТП смешения дизельного топлива в потоке. При этом показано, что в результате снижается избыточный запас и стабилизируется качество продукции как на этапе смешения, так и на этапе наполнения товарных резервуаров.

По данным зарубежных источников [9] на нефтеперерабатывающем заводе мощностью около 16 тыс. м³/сут экономический эффект от работы систем смешения с использованием программы оптимизации превышает 3 млн. долл. США в год.

Работа выполнена в ОАО специализированная инженеринговая компания "Севзапмонтажавтоматика" (ОАО СПИК СЗМА), Санкт-Петербург.

Контактный телефон +7(812)350-58-85.

E-mail: Vladimir_Nikitin@szma.com,
amusaev@szma.com.

Список литературы

1. Вершинин В. И., Симанчев Р. Ю. Расчет состава смесей с заданным набором свойств // Вестник Омского университета. 1988. № 4.
2. Гуреев А. А., Жоров Ю. М., Смидович Е. В. Производство высокооктановых бензинов. М.: Химия, 1981.

3. Залищевский Г. Д., Поздьяев В. В., Лисицын Н. В., Кузичкин Н. В. Оптимальное компаундирование дизельных топлив // Нефтепереработка и нефтехимия. 2002. № 4.
4. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление // Пер. с англ. под ред. А.С. Ш а т а л о в а. М.: Энергия, 1973.
5. Мусаев А. А., Никитин В. А. Программно-алгоритмический комплекс расширенного управления многопараметрическими технологическими процессами на основе прогностических моделей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 3.
6. ГОСТ 305-82* (уточненный в 2000 г.). Топливо дизельное. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1995.
7. Мусаев А. А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными ТП // Автоматизация в промышленности. 2003. № 8.
8. Мусаев А. А., Никитин В. А. Оценивание качества управления процессами на основе многомерного статистического контроля // Методы менеджмента качества. 2006. № 12.
9. Arwika K., Astrom T. Swedish refiner installs advanced blend control system // Oil and Gas Journal. 2003. № 11.