

Виртуальный анализатор показателей качества нефтепродуктов

А. А. Савкин

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
e-mail: artemsavkin1996@gmail.com

А. А. Мусаев

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
e-mail: amusaev@technolog.edu.ru

М. М. Фенин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
e-mail: mmf_spb@mail.ru

Аннотация. Наличие корреляционных связей между показателями качества товарных нефтепродуктов позволяет восстанавливать недостающие значения, а также контролировать корректность результатов online мониторинга. В простейшем случае неопределенность условий, сопровождающая процесс смешения углеводородных растворов, моделируется на основе многомерного гауссовского распределения. Предложена процедура оценивания контролируемых параметров нефтепродуктов, базирующаяся на многомерном статистическом анализе имеющихся наблюдений.

Ключевые слова: виртуальный анализатор; неполные данные; гауссовское распределение; многомерный статистический анализ

I. ВВЕДЕНИЕ

В общем случае процесс приготовления товарного топлива собой динамическое (в потоке) или статическое (в резервуаре) смешение углеводородных растворов, обеспечивающий получение выходного продукта с заданными параметрами качества. При этом динамическая система смешения в потоке обеспечивает значительную экономию ресурсов и улучшение характеристик перемешивания, но требует достаточно сложного адаптивного управления процессом с целью получения соответствия параметров продукта товарным нормативам. На практике эта процедура осложняется наличием нескольких уровней неопределенности, наиболее существенный из которых обусловлен значительным разбросом свойств поступающих компонентов смешения. Проблема усугубляется тем, что стандартный (штатный) набор показателей качества исходных компонентов не описывает исчерпывающим образом их свойства при смешении: два набора компонентов с одинаковым процентным составом (по массе) и одинаковыми штатными показателями компонентов могут приводить к смесям с несколько различающимися свойствами. При потоковой организации процесса смешения это приводит к необходимости последовательной коррекции параметров взлива по мере получения результатов текущих анализов

(как правило, неполных). Эффективность данного подхода может оцениваться либо величиной запаса по качеству (близостью показателей конечного продукта к границам поля допуска для данного вида продукции), либо обобщенным экономическим показателем, учитывающим различную себестоимость компонентов.

Эффективность данного подхода снижается из-за медленного процесса анализа, включающего извлечение проб, пересылку их в лабораторию и ожидания результатов измерений, которое продолжается несколько часов. В это время управление технологическим процессом выполняется на основе предположений общего характера, опыта и интуиции персонала. В результате управление ведется с большим запасом по качеству, что ведет в первую очередь к увеличению потребления материальных ресурсов и снижению прибыльности [1].

Таким образом, одним из препятствий для дальнейшего повышения эффективности используемых технологических решений является неполнота и недостаточная оперативность информации о свойствах основных компонентов и, главное, о свойствах выходной продукции. Проблема оперативности в настоящее время успешно решается за счет внедрения современных поточных анализаторов [2]. В качестве одного из средств борьбы с неполнотой информации в настоящей работе предлагается процедура статистического оценивания ненаблюдаемых физико-химических показателей на основе доступных на каждом этапе результатов текущих анализов.

II. МОДЕЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Вероятностной модели описания неопределенности базируется на гипотезе о коррелированности параметров формируемой углеводородной смеси. Данная гипотеза легко подтверждается анализом формируемых наблюдений. Поскольку измеряемые показатели имеют различную размерность и различные средние значения, необходимо перейти от результатов анализа в реальных единицах измерения к безразмерным величинам, при

котором за единицу измерения каждой компоненты принимается оценка ее среднеквадратического отклонения (ско). Таким образом, в качестве исходных данных используется матрица Y размерности $\langle n \times m \rangle$ результатов анализов партий готовой смеси: n – число партий, m – количество анализируемых показателей. Элемент y_{ki} матрицы Y представляет собой результат измерения j -го показателя в k -ой партии. Пусть y – $\langle 1 \times m \rangle$ вектор средних значений показателей, s – $\langle 1 \times m \rangle$ вектор их ско. Нормировка данных осуществляется делением каждого столбца матрицы Y на соответствующий элемент вектора s . В результате получается матрица Y_0 результатов анализов в безразмерных величинах.

Пусть $S = \text{diag}(s)$ – диагональная матрица $\langle m \times m \rangle$, на диагонали которой стоят элементы вектора ско s , S^{-1} – обратная матрица по отношению к S . Тогда

$$Y_0 = Y \cdot S^{-1}; \quad Y = Y_0 \cdot S. \quad (1)$$

Вторая из формул (1) позволяет вернуться от безразмерных величин к их значениям в реальных единицах измерения. Y_0 в выражении (1) – матрица $\langle m \times m \rangle$ результатов анализа данного набора партий готовой смеси в безразмерных величинах, $y_{0 \langle 1 \times m \rangle}$ – вектор средних, $P_{\langle m \times m \rangle}$ – ковариационная матрица. Предположим, что первые q признаков (элементы вектора результатов анализов) являются наблюдаемыми, а остальные r – ненаблюдаемыми, $q + r = m$. Это разбиение порождает соответствующее блочное представление матрицы Σ и вектора средних:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} \end{bmatrix}, \quad y_0 = [y_{01}^T, \quad y_{02}^T]^T. \quad (2)$$

где P_{11} и P_{22} – ковариационные (за счет выбранной системы единиц – корреляционные) матрицы соответственно наблюдаемых и ненаблюдаемых компонент результатов анализа, P_{12} – взаимная ковариационная (корреляционная) матрица наблюдаемых и ненаблюдаемых компонент. Тогда для оптимального линейного среднеквадратического восстановления вектора $z_{02} \langle 1 \times q \rangle$ ненаблюдаемых признаков по вектору $z_{01} \langle 1 \times p \rangle$ наблюдаемых имеет место следующая множественная регрессия [3]:

$$z_{02} = E\{z_{02}\} + P_{12}^T P_{11}^{-1} (z_{01} - E\{z_{01}\}), \\ E\{z_{01}\} = y_{01}, \quad E\{z_{02}\} = y_{02}. \quad (3)$$

Данный подход обладает тем преимуществом, что матрица Σ_{12} и векторы y_{01} , y_{02} статистически оцениваются и запоминаются один раз на стадии обработки результатов анализов выходного продукта. При каждом конкретном сеансе восстановления недостающих результатов анализов Σ_{12} просто перегруппировывается:

строки и столбцы, соответствующие наблюдаемым признакам, собираются в верхний левый угол матрицы, ненаблюдаемым – в нижний правый. Полученная оценка является несмещенной. Ковариационная матрица погрешностей оценивания имеет вид:

$$P_R = P_{22} - P_{12}^T P_{11}^{-1} P_{12}, \quad (4)$$

ее диагональные элементы – дисперсии погрешностей оценивания по компонентам (в безразмерных величинах).

Данный подход можно применить расширительно, рассматривая все результаты анализов и соответствующие им данные о массовом процентном составе смеси как единый вектор признаков. В этом случае появляется единая законченная схема оценивания всех недостающих признаков по набору наблюдаемых.

III. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ

Технические вычисления и визуализация результатов оценивания осуществляется посредством программного виртуального анализатора [4-6]. Визуализация предполагает редукции размерности решаемой задачи. Результаты анализов физико-химических свойств смеси в безразмерных величинах можно ортогонализировать и выделить два некоррелированных главных компонента, объясняющих максимально достижимую часть общего рассеяния изучаемого массива данных. При этом любой результат анализа представится точкой на плоскости главных компонент в обобщенном фазовом пространстве. При этом границы допуска, определяемые стандартом товарной продукции, трансформируются в точечные границы для этих главных компонент. Это позволяет следить за процессом поточного смешения, отображая движение фазовых векторов на этой плоскости и визуально сравнивая полученные оценки с реальными результатами текущих анализов.

Это представление крайне наглядно, но, к сожалению, страдает неполнотой (чтобы отобразить 97,5 % информации, нужно иметь не 2, а 6 факторов) и не имеет наглядной физической интерпретации. Тем не менее, оно очень удобно, например, для обучения технического персонала.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходных данных рассмотрим результаты анализов физико-химических свойств готовых партий летнего низкосернистого дизельного топлива (ДТ) на конкретном нефтеперерабатывающем предприятии. Они собраны в матрицу Y : ее строки – результаты анализа свойств этих партий ДТ в следующем порядке: (1) температура вспышки, 0С; (2) кинематическая вязкость, с; (3) температура помутнения, 0С; (4) температура застывания, 0С; (5) предельная температура фильтруемости, 0С; (6) Массовая доля серы, % масс.; фракционный состав: (7) начало кипения, 0С; (8) 10%, 0С; (9) 50%, 0С; (10) 90%, 0С; (11) 96%, 0С.

Анализ корреляционной матрицы приведенных параметров позволил сделать вывод о том, что

восстановление пропущенных параметров с погрешностью 3.7% возможен при использовании 5 комбинаций признаков – главных компонент. Наибольшая точность восстановления достигается при использовании следующих физико-химических показателей в порядке возрастания суммы квадратов коэффициентов корреляции: массовая доля серы, фракционный состав 50%, температура застывания, температура вспышки, фракционный состав 96%.

При использовании всего двух главных компонент (главных факторов) достигается объяснение 78.3% имеющегося рассеяния, что позволяет получать визуализацию на плоскости различных процессов, связанных со смешением нефтепродуктов. В случае использования набора наблюдаемых показателей, состоящего из температуры вспышки, массовой доли серы, фракционного состава (5 показателей), ско оценок ненаблюдаемых показателей равны: температуры застывания и предельной температуры фильтруемости – 0.095 оС, температуры помутнения – 0.0547 оС, кинематической вязкости – 0.095.

V. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ

В таблице приведены неполные данные о физико-химических показателях нескольких контрольных смесей и построенные по приведенной методике статистические оценки недостающих показателей.

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИНЕЙНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Параметр	Измерение	Оценка	Измерение	Оценка	Измерение	Оценка
1	79	79.5	73	75	84	81.5
2	4.6	4.8	4.3	4.41	5.20	5.3
3	-8	6.2	-8	-7.7	-5	-4.6
4	-10	9.8	-16	-14.7	-12	-13.5
5	-8	-6.3	-8	-7.6	-5	-4.6
6	0.04	0.042	0.043	0.044	0.044	0.045
7	206	201	200	201	207	203
8	229	232	223	223.0	236	234
9	271	273	267	269	276	276
10	332	333	329	329.1	335	336
11	352	353	350	351	354	354

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Приведенные результаты демонстрируют возможность и эффективность применения методов многомерного статистического анализа, основанных, вообще говоря, на предположении гауссовости и некоррелированности, для моделирования условий неопределенности, в которых протекают процессы смешения нефтепродуктов.
2. Подход, базирующийся на приближенном оценивании ненаблюдаемых показателей на основе имеющихся, используется на уровне понимания основных закономерностей всеми квалифицированными технологами. В настоящей работе получена теоретическая основа для автоматизированного получения таких оценок и контроля их точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гаранина, Л.В. Ресурсосбережение на предприятии // Научные исследования: теория, методика и практика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 21 мая 2017 г.). В 2 т. Т. 2 / редкол.: О.Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. – С. 47-49.
- [2] Большая энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс] // Поточный анализатор/ ред. Мавлютов Р. / URL: <https://www.ngpedia.ru/id36639p1.html> (дата обращения: 02.04.2018)
- [3] Аристова, Е. М. Определение оптимальных значений факторов множественной регрессии с помощью многокритериальной оптимизации/Е.М. Аристова, Н.В. Сапкина/ Известия Тульского государственного университета. Технические науки, no. 1, 2017, pp. 265-275.
- [4] Опыт разработки системы виртуального анализа показателей качества продуктов установок каталитического реформинга бензиновых фракций и системы их подстройки в режиме реального времени / А.Г. Шумихин [и др.] / Пермь, Россия, 2017 с. 45-61
- [5] Тугашова Л. Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/virtualnye-analizatory-pokazateley-kachestva-protsessa-rectifikatsii> (дата обращения: 02.04.2018).
- [6] G. B. Digo, N. B. Digo, I. S. Mozharovskiy, A. Yu. Torgashov/ Model Identification of Virtual Analyzers of a Weakly Formalized Technological Object/ Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok/ pp. 46-51/ 02.11.2014