

# Идентификация виртуальных анализаторов качества продуктов, производимых на установках первичной переработки смеси сырой и ловушечной нефти с некондицией

В. Ю. Улазевич  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
ООО «КИНЕФ»  
ulazevich@yandex.ru

И. В. Жуков  
ООО «КИНЕФ»  
zhukov\_i\_v@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются особенности разработки математических моделей, описывающих качество продуктов, получаемых на установках первичной переработки сырой нефти, которые работают в условиях периодического вовлечения в основное сырьё ловушечного и/или некондиционного продуктов. Показано, что для таких моделей помимо параметров, характеризующих технологический процесс, целесообразно использовать в качестве входов параметры, характеризующие сырьё. Построена, протестирована и внедрена математическая модель температуры конца кипения фракции 105-180 °С установки ЭЛОУ-АТ-1 ООО «КИНЕФ».

**Ключевые слова:** виртуальный анализатор; регрессионная модель; показатель качества; ректификация; непостоянство сырьевого состава; нефтеловушка

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, решаемых на нефтеперерабатывающих заводах, является очистка сточных вод, загрязненных нефтепродуктами, солями, механическими и другими примесями. Нефтепродукты, находящиеся в сточных водах в нерастворенном виде, удаляются на горизонтальных отстойниках специальной конструкции – нефтеловушках – и требуют дальнейшей переработки.

На ООО «КИНЕФ» переработка ловушечной нефти (ловушечного продукта) осуществляется на установке ЭЛОУ-АТ-1. Периодическое вовлечение в сырую нефть ловушечного и/или некондиционного продуктов и использование этой смеси в качестве сырья является отличительной особенностью данной установки первичной переработки.

Требования к качеству поставляемой российским нефтеперерабатывающим заводам сырой нефти определяет ГОСТ Р 51858; требования к ловушечной нефти государственными и отраслевыми стандартами не устанавливаются, а определяются на уровне предприятий.

Из табл. 1 видно, что нормы показателей качества ловушечного продукта значительно менее строгие в сравнении с нормами по качеству сырой нефти; углеводородный и фракционный составы ловушечной нефти и некондиционного продукта могут значительно меняться, при этом смешение компонентов сырья ЭЛОУ-АТ-1 происходит в широком диапазоне пропорций.

ТАБЛИЦА 1  
ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА НЕКОТОРЫХ  
НАИМЕНОВАНИЙ СЫРЬЯ УСТАНОВКИ ЭЛОУ-АТ-1 ООО «КИНЕФ»,  
ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ДЛЯ ПРОВЕРКИ

Наименование сырья	Показатель качества	Норма
Нефть сырая	Массовая доля воды, %, не более	
	I группа	0,5
	II группа	0,5
	III группа	1,0
	Концентрация хлористых солей, мг/дм <sup>3</sup> , не более	
	I группа	100
	II группа	300
Продукт ловушечный	III группа	900
	Массовая доля механических примесей, %, не более	
	I, II, III группы	0,05
	Давление насыщенных паров, кПа (мм рт. ст.), не более	66,7 (500)
	Массовая доля органических хлоридов во фракции, выкипающей до температуры 204 °С, млн. <sup>-1</sup> (ppm), не более	10
Продукт ловушечный	Содержание хлористых солей, мг/дм <sup>3</sup> , не более	Не нормируется
	Содержание воды в средней пробе, % об., не более	2,0
	Содержание механических примесей, % масс., не более	0,5

Совокупность перечисленных выше факторов непостоянства сырьевого состава оказывает влияние на технологический процесс, на качество продуктов производства.

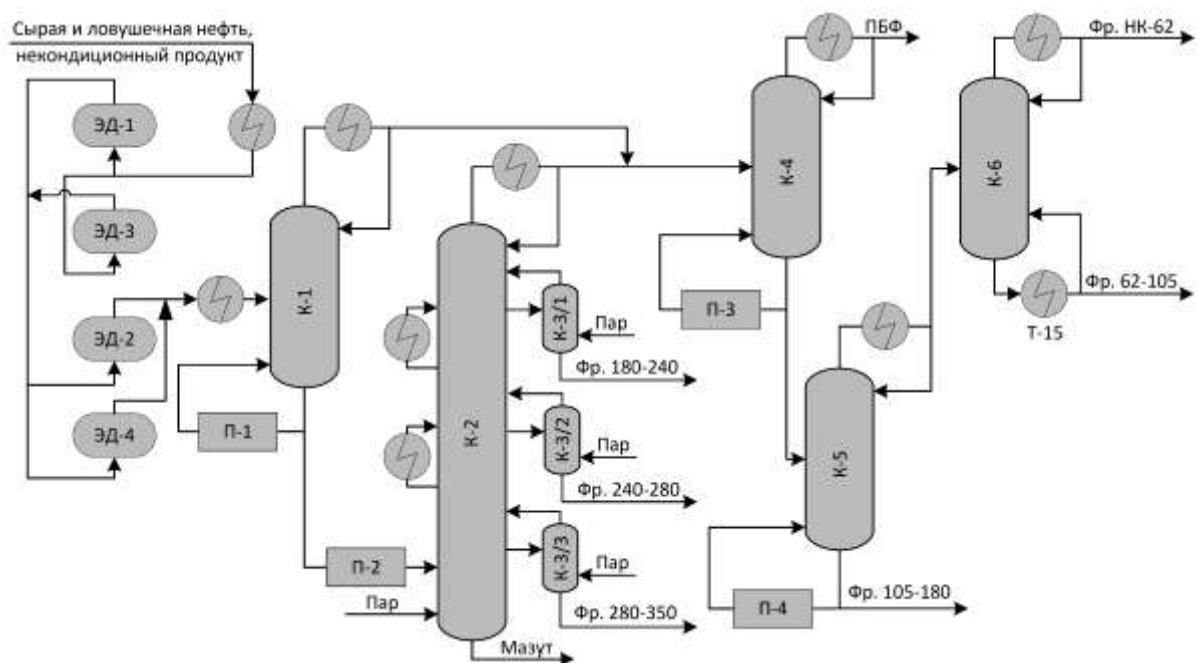


Рис. 1. Упрощенная схема установки ЭЛОУ-АТ-1 ООО «КИНЕФ»

В описанных условиях повышаются требования к оперативности получения значений показателей качества производимых продуктов, и удовлетворить эти требования способны виртуальные анализаторы (ВА) [1].

## II. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ ЭЛОУ-АТ-1

Схема установки ЭЛОУ-АТ-1 изображена на рис. 1. Предварительно нагретое на блоке теплообмена сырьё поступает на блок электродегидраторов (ЭЛОУ), состоящий из двух ступеней. В первую ступень входят электродегидраторы ЭД-1 и ЭД-3, во вторую – ЭД-2 и ЭД-4. Обессоленная и обезвоженная нефть после ЭЛОУ проходит еще один блок теплообмена и подаётся в отбензинивающую колонну К-1, кубовый продукт которой для поддержания температуры низа К-1 частично прокачивается через печь П-1 и возвращается «горячей струей», частично через печь П-2 поступает в колонну К-2. Верхний продукт колонн К-1 и К-2, нестабильный бензин, подаётся в колонну К-4, а также частично возвращается в соответствующие колонны в виде орошения. Колонна К-2 имеет 2 циркуляционных орошения и 3 боковых отбора, связанных со стриппингами (отпарными колоннами) К-3/1, К-3/2 и К-3/3, на выходе которых фракции 180–240 °С, 240–280 °С и 280–350 °С соответственно. С низа колонны К-2 выводится мазут. Верхним продуктом колонны стабилизации К-4 является пропано-бутановая фракция (ПБФ), а нижним – стабильный бензин. Температура в кубе колонны К-4 поддерживается «горячей струей» из печи П-3, температура верха – орошением. Стабильный бензин колонны К-4 поступает в колонну К-5, нижний продукт которой, фракция 105–180 °С, выводится с установки, а верхний, НК-105 °С, подаётся в колонну К-6. Поддержание температуры в кубе К-5 обеспечивается печью П-4, в кубе К-6 – ребойлером Т-15; температуры

верха обеих колонн поддерживаются орошением. С верха колонны К-6 выводится фракция НК-62 °С, а с низа – 62–105 °С.

## III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СЫРЬЁ, НА КАЧЕСТВО МОДЕЛИ КОНЦА КИПЕНИЯ ФРАКЦИИ 105–180 °С

На установках первичной переработки нефти в качестве входных переменных моделей показателей качества продуктов, как правило, используются параметры процесса, характеризующие технологический режим работы ректификационных колонн [2, 3]. Было сформулировано предположение о том, что для исследуемого в работе объекта, ввиду значительного непостоянства сырьевого состава, улучшение качества идентифицируемых моделей может быть достигнуто использованием, помимо прочих, входных параметров, непосредственно или косвенно характеризующих сырьё. Для проверки данного предположения в ходе исследования выполнена идентификация модели одного из ключевых показателей качества фракции 105–180 °С – температуры конца кипения ( $T_{kk}$ ) – с использованием наиболее значимых технологических параметров колонн К-1 и К-2, плотности сырья, расхода ловушечной нефти, расхода смеси сырой нефти с некондичией и отношения этих расходов.

### А. Математическая основа эксперимента

В настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах наибольшее распространение получили ВА на базе регрессионных моделей, которые имеют вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i,$$

где  $x_i$  –  $i$ -я входная переменная,  $y$  – выходная переменная,  $n$  – количество входов,  $b_0$  – свободный член,  $b_i$  –  $i$ -ый коэффициент.

Идентификация коэффициентов моделей может производиться различными методами, в данной работе был использован наиболее часто встречающийся из них – метод наименьших квадратов.

Статистическая значимость входных переменных модели оценивалась по коэффициенту корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где  $x_i$  –  $i$ -е значение анализируемой входной переменной;  
 $y_i$  –  $i$ -е значение анализируемой выходной переменной;  
 $\bar{x}$  – среднее значение результатов измерения анализируемой входной переменной;  $\bar{y}$  – среднее значение результатов измерения анализируемой выходной переменной;  $n$  – количество измерений.

Для оценки качества моделей в исследовании использовался коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где  $y_i$  –  $i$ -е значение выходной переменной, полученное на реальном объекте,  $\hat{y}_i$  –  $i$ -е значение выходной переменной, полученное моделированием,  $\bar{y}$  – среднее значение результатов измерения выходной переменной на реальном объекте,  $n$  – количество измерений.

## В. Алгоритм исследования

Исследование проводилось по следующему алгоритму:

1. Выбор наиболее значимых с технологической точки зрения входных параметров и определение связи (прямая или обратная) каждого из них с выходным параметром.

2. Поиск параметров, наиболее коррелирующих с искомым показателем качества, среди выбранных на шаге 1. Поиск выполняется путём ранжирования параметров по абсолютному значению коэффициента корреляции.

3. Определение транспортного запаздывания. Цикл работы поточного анализатора фракционного состава длится около 40 минут, тогда как показания остальных датчиков обновляются значительно быстрее; к тому же поточный анализатор смонтирован на значительном удалении от колонн, в которых формируется искомый показатель качества, и от сырьевых трубопроводов, на которых установлены расходомеры и плотномер сырья.

Таким образом, требуется соотнесение показаний поточного анализатора с показаниями измерительных приборов, используемых в качестве входных данных модели. Соотнесение производится путём временного сдвига на величину транспортного запаздывания, которая находится следующим образом.

Выбирает диапазон поиска, затем строятся модели с каждым из значений временного сдвига из данного диапазона, и определяются коэффициенты детерминации полученных моделей. Входом моделей является параметр с наибольшим абсолютным значением коэффициента корреляции, определенным на шаге 2. Временной сдвиг, при котором была получена модель с максимальным коэффициентом детерминации, принимается за транспортное запаздывание.

4. Построение моделей. Выборка данных делится на обучающую и проверочную. Модели строятся на обучающей выборке с использованием наиболее коррелирующих входных параметров, определенных на шаге 2, со сдвигом данных на величину транспортного запаздывания, найденного на шаге 3. Построение производится со всеми возможными комбинациями входов. Коэффициенты моделей определяются методом наименьших квадратов.

5. Отбор технологически верных моделей. Из построенных на шаге 4 моделей отбирают лишь те, знаки коэффициентов которых соответствуют установленным на шаге 1 связям.

6. Поиск лучшей из отобранных моделей. Отобранные на шаге 5 модели ранжируются по величине коэффициента детерминации на проверочной выборке. Модель с наивысшим коэффициентом детерминации используется для дальнейшего анализа.

7. Построение модели, отобранной на шаге 6, без использования входов, характеризующих сырьё. При наличии входов, характеризующих сырьё, в модели, отобранной на шаге 6, производится построение новой модели с теми же входами, за исключением параметров, характеризующих сырьё, и по тому же принципу (см. пункт 4 алгоритма), но без перебора комбинаций входов. При отсутствии указанных выше входов в отобранной на шаге 6 модели, выполнение алгоритма прекращается.

8. Сравнение показателей качества модели, отобранной на шаге 6, с показателями качества модели, построенной на шаге 7.

## С. Результаты исследования

В исследовании использовалась выборка за 10 дней с частотой данных 1 значение в минуту. На первом этапе были выбраны 22 наиболее значимых технологических параметра, из которых отобраны 10 наиболее коррелирующих с  $T_{kk}$ . В табл. 2 представлены технологические параметры, ранжированные по абсолютному значению коэффициента корреляции с  $T_{kk}$ , а также указаны соответствующие знаки связи каждого из

параметров с  $T_{kk}$ : знак «+» обозначает прямую связь, знак «-» – обратную.

ТАБЛИЦА II  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, НАИБОЛЕЕ  
КОРРЕЛИРУЮЩИЕ С ТЕМПЕРАТУРОЙ КОНЦА КИПЕНИЯ ФРАКЦИИ 105-  
180 °С

№	Имя	Описание	Влияние на выходную переменную	Абсолютное значение R
1	TIC1034	Температура верха К-1	+	0.708
2	QI1501	Плотность сырья	Не учитывалось	0.651
3	RRK1	Флегмовое число К-1	-	0.584
4	FICP_2	Расход сырья К-2	Не учитывалось	0.524
5	FIC1331	Расход орошения К-1	-	0.413
6	PIC1243	Давление верха К-2	-	0.389
7	TI1033	Температура куба К-1	+	0.385
8	FI1310	Расход ловушечной нефти	Не учитывалось	0.339
9	dF_LS	Отношение расхода ловушечной нефти к расходу смеси сырой нефти с некондицией	Не учитывалось	0.335
10	FIC1304	Расход продукта К-3/2	Не учитывалось	0.328

Поиск транспортного запаздывания проводился в диапазоне от 0 до 480 минут. На рис. 2 показана зависимость коэффициента детерминации от величины временного сдвига. Видно, что наибольший коэффициент детерминации был получен при сдвиге на 250 минут.

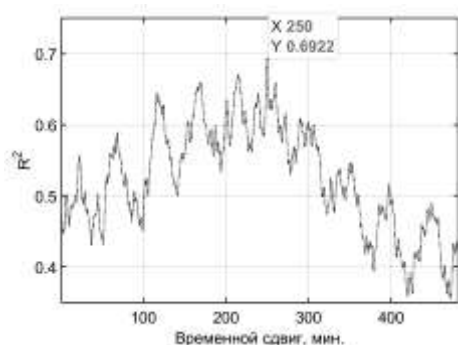


Рис. 2. Зависимость коэффициента детерминации от величины временного сдвига

При поиске лучшей модели выборка делилась на обучающую и проверочную в соотношении 70/30. Наибольший коэффициент детерминации на проверочной выборке показала модель следующего вида (далее Модель №1):

$$T_{kk} = 389.987 + 0.584 \cdot TIC1034 - 0.301 \cdot QI1501 - 8.837 \cdot RRK1 - 0.090 \cdot FICP_2 - 0.840 \cdot FIC1331 - 0.845 \cdot FI1310 + 156.390 \cdot dF_LS - 0.200 \cdot FIC1304.$$

Работа данной модели показана на рис. 3.

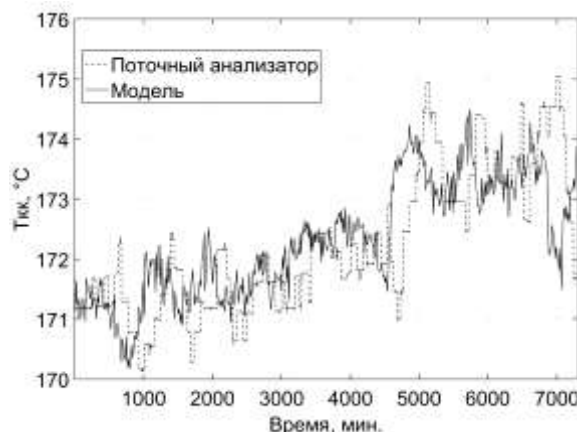


Рис. 3. Сравнение показаний модели №1 с показаниями поточного анализатора

В табл. 3 приведены значения коэффициентов детерминации модели №1 и модели, построенной на входах модели №1, за исключением параметров at1\_QI1501.PV, at1\_FI1310.PV и dF\_LS (далее Модель №2).

ТАБЛИЦА III  
КАЧЕСТВО МОДЕЛЕЙ

Модель	Коэффициент детерминации	
	На обучающей выборке	На проверочной выборке
№1	0.755	0.581
№2	0.725	0.550

Как видно из таблицы, коэффициент детерминации модели №1 больше чем коэффициент детерминации модели №2 на 0.03 и 0.031 на обучающей и проверочной выборках соответственно.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При существенном непостоянстве сырья установок первичной переработки нефти целесообразно использовать в качестве входов моделей, описывающих качество продуктов, наряду с параметрами, характеризующими процесс, параметры, характеризующие сырье, а именно плотность, расходы компонентов сырья и отношения этих расходов. Проведенное исследование показало улучшение качества модели температуры конца кипения фракции 105-180 °С как на обучающей так и на проверочной выборке за счет добавления указанных выше входов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жуков И.В., Харазов В.Г. Сравнительный анализ работы виртуальных и поточных анализаторов на установках первичной переработки нефти. Автоматизация в промышленности, №3, 2015, с. 8-10
- [2] Тугашова Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №3
- [3] Торгашов А.Ю., Можаровский И.С., Диго Г.Б., Диго Н.Б. Разработка моделей показателей качества ректификационных колонн, функционирующих в предельных режимах // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. С. 211-221