

Гонч

На правах рукописи

Гончаров Антон Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ  
АНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ АСУ ТП РЕКТИФИКАЦИИ НЕФТИ**

05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Торгашов Андрей Юрьевич**,  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник лаборатории систем управления  
технологическими процессами ФГБУН  
Институт автоматики и процессов  
управления ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: **Веревкин Александр Павлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры автоматизации  
технологических процессов и производств  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет», г. Уфа

**Благодарный Николай Семенович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой автоматизации  
технологических процессов ФГБОУ ВО  
«Ангарский государственный технический  
университет», г. Ангарск

Ведущая организация: ФГБУН Институт проблем управления им.  
В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, корпус 3, аудитория 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» и на сайте [www.knastu.ru](http://www.knastu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 999.086.03, к.т.н.



А. С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Управление процессом переработки нефти осуществляется в условиях регламентированных целевых показателей качества продуктов. Целью управления процессом является максимизация выхода целевых продуктов заданного качества, по возможности, при минимальном расходе энергетических и материальных затрат. Выбор величины управляющих воздействий осуществляется исходя из ограничений на значения параметров технологического процесса, показателей качества продуктов и критериев эффективности процесса.

Поступающее на установку первичной переработки нефти сырье отличается по составу, соответственно, изменяется и состав полученных продуктов. Для получения продуктов регламентированного качества требуется информация о качестве получаемых продуктов, на основании которой корректируется режим работы ректификационной колонны. Как правило, оценка качества выходного продукта осуществляется на основе результатов лабораторных анализов и данных поточных анализаторов. Данные заводской лаборатории и поточных анализаторов не позволяют своевременно оценить качество товарной продукции, а полученная задержка информации о характеристиках выходного продукта вызывает излишние материальные затраты и приводит либо к получению меньшего объема целевых продуктов с большим запасом по качеству, либо к производственному браку, когда продукт, не соответствует нормам, снижается эффективность процесса. Настройка технологического режима работы установки первичной переработки нефти часто занимает время от нескольких часов до нескольких суток.

Регулярно поступающая оперативно измеряемая информация с контрольно-измерительных приборов установки дает возможность оператору спрогнозировать изменение качества продуктов и через управляющее воздействие поддерживать качество продуктов. Но данная оценка качества продуктов проводится по плохо формализованным критериям и зависит от опыта обслуживающего персонала, присутствует также временная задержка от момента обнаружения изменений показаний приборов до принятия решений.

Последнее время для оперативного оценивания качества продуктов процесса нефтепереработки в составе АСУ ТП широко применяются виртуальные анализаторы (ВА). Они представляют собой программно-алгоритмические комплексы, содержащие в себе модели, связывающие оперативно измеряемые показания контрольно-измерительных приборов с оценкой качества продукта.

Методы разработки моделей ВА для задач управления процессом ректификации нефти получили развитие как в трудах отечественных ученых О. С. Кожинского, Р.А. Аузана, Г. М. Бакан, Т.И. Копысицкого, Н.Н. Бахтадзе, А.П. Веревкина, А.Г. Шумихина, А.А. Мусаева так и трудах зарубежных ученых D. N. Saraf, N. Bolf, P. Angelov, L. Fortuna, P. Kadlec, M. Kano и др.

ВА позволяют оперативно получать оценку качества продуктов, но низкое качество моделей ВА не позволяет использовать преимуществ оперативного оценивания качества продуктов. Причиной низкого качества моделей ВА в промышленных условиях являются:

- 1) малая обучающая выборка данных измерений показателя качества продукта;
- 2) погрешности показаний контрольно-измерительных приборов;
- 3) малый диапазон изменчивости величины входов ВА;
- 4) воздействие внешних неизмеряемых возмущений;
- 5) неточные данные о времени отбора проб продуктов для лабораторных измерений качества.

Невозможность регулярного оперативного оценивания состава сырья, частое отсутствие стационарных состояний технологического объекта, сложность динамики массообменного процесса препятствует применению строгой (аналитической) модели процесса. Выбор структуры модели ВА часто делается с отрывом от физико-химических особенностей технологического процесса.

Учитывая изложенное, можно заключить, что проблема оперативного оценивания качества продуктов процесса первичной переработки нефти является актуальной. С целью преодоления указанных проблем и повышения эффективности АСУ ТП требуется разработка новых алгоритмов и методов для идентификации моделей ВА.

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящей работы – разработка алгоритмов и методов идентификации моделей ВА, реализуемых в составе АСУ ТП, для процесса первичной переработки нефти.

Для достижения общей цели поставлены следующие основные задачи:

1. провести анализ существующих методов идентификации моделей ВА;
2. определить класс моделей ВА, обеспечивающих более точную оценку качества продуктов;
3. разработать алгоритмы обработки данных измерений поточного анализатора, других контрольно-измерительных приборов;
4. разработать метод определения набора входов для модели ВА при малой обучающей выборке данных;
5. разработать алгоритмы и методы идентификации моделей ВА в условиях малой обучающей выборки данных;
6. получить модели ВА на примере процесса первичной переработки нефти.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Метод сглаживания переходных характеристик ВА с использованием вейвлет-преобразования.
2. Метод определения набора входов для модели ВА, исходя из промышленных данных и данных строгого моделирования процесса.
3. Алгоритм идентификации линейной регрессионной модели статического ВА с использованием ограничений на параметры модели.

4. Алгоритм идентификации динамической модели ВА в виде импульсных характеристик с использованием ограничений на коэффициенты модели.

**Научная новизна.**

1. Разработан алгоритм для определения набора входов модели ВА, исходя из данных пошагового тестирования, полученных на основе строгой модели процесса ректификации нефти.
2. Предложен метод сглаживания переходных характеристик ВА с использованием вейвлет-преобразования.
3. Разработаны алгоритмы получения моделей ВА процесса первичной переработки нефти с учетом ограничений на параметры модели. Интервалы изменения параметров модели находятся в результате строго моделирования процесса ректификации нефти.

**Практическая значимость работы.** Разработанные модели приняты Киришским нефтеперерабатывающим заводом для их использования в управлении процессом первичной и вторичной переработки нефти на установке ЭЛОУ АВТ-2.

Модели, полученные с использованием разработанного алгоритма идентификации, внедрены на АВТ-8 Омского нефтеперерабатывающего завода.

Разработана и зарегистрирована программа «Расчёт параметров модели виртуального анализатора с учетом ограничений», предназначенная для определения параметров модели ВА в составе АСУ ТП.

Динамические модели ВА реализованы на программных средствах АСУ ТП, Profit Suite for Advanced Control & Optimization (APC-сервер Honeywell) на базе АСУ ТП Experion PKS.

**Методы исследования.** В диссертационной работе при решении поставленных задач были использованы: теория идентификации объектов управления, теория ректификации, математическое моделирование, теория автоматического управления, методы оптимизации, теория вероятности, математическая статистика. В качестве инструментов моделирования и программирования применялись пакеты прикладных программ: MATLAB, UniSim (моделирование промышленных процессов, корпорация Honeywell™), Visual Studio Express.

**Обоснование и достоверность результатов и выводов** обеспечивается корректным применением используемых в работе теоретических методов и подтверждается полученными в диссертации результатами численных и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: XXXVI Дальневосточной математической школе-семинаре имени академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2012г.), XXXVII Дальневосточной математической школе-семинаре имени академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2013г.), XXXVIII Дальневосточной математической школе-семинаре имени академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2014г.), Международной конференции «Нефть и Газ – АТР 2015. Ресурсы, транспорт, сотрудничество» (Владивосток, 2015г.), Международной научной конференции

«Дискретная оптимизация и исследование операций» (Владивосток, 2016г.), XII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2014г.), XXVIII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2015г.), XXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Санкт-Петербург, 2016г.), Международной научно-практической конференции «НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКА-2016» (Уфа, 2016г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, индексированном Scopus, 1 авторское свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, 5 глав основного текста, выводы по диссертации, список литературы из 126 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 133 странице, содержит 22 рисунка, 21 таблицу.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** аргументирована актуальность темы диссертации, определены задачи исследований и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** рассматривается текущее состояние области определения качества продуктов процесса ректификации нефти с помощью ВА. Описывается роль ВА в АСУ ТП. Рассматривается традиционная процедура идентификации модели ВА.

Приводится обзор используемых моделей и методов для получения ВА процесса первичной переработки нефти. Отмечено, что в большинстве работ используются линейные регрессионные модели и модели на основе нейронной сети.

Строгая (аналитическая) модель процесса ректификации состоит из системы уравнений, которая содержит уравнения фазового равновесия, материального баланса и энергетического баланса. Использование строгой модели процесса ректификации нефти для получения на ее основе оценок качества продуктов, сталкивается с проблемой невозможности оперативного оценивания состава сырья и вынужденной мерой путем экстраполяции прогнозировать изменение состава сырья. Результаты данного подхода не оказываются лучшими по сравнению с регрессионными моделями. Следует учитывать и то, что строгая модель процесса не полностью соответствует промышленному процессу, получена на ряде приближений и нуждается в калибровке на основании данных промышленного процесса.

Рассмотрена традиционная процедура идентификации моделей ВА, состоящая из следующих шагов:

- 1) обработка данных измерений контрольно-измерительных приборов;
- 2) выбор структуры модели;
- 3) выбор входов и определение параметров модели;
- 4) валидация (проверка) модели.

Приводится описание процедуры идентификации моделей ВА, указываются методы, используемые для решения задач на каждом шаге. Отмечено, что при условии выхода установки с ремонта, когда количество измерений качества продуктов может ограничиваться несколькими десятками, приоритетно получение упрощенного математического описания процесса, моделей с незначительным числом входов.

Рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются разработчики при идентификации моделей ВА, решение которых традиционными методами приводит к получению моделей низкого качества.

Обоснованы цели и задачи исследований.

**В главе 2** приводится описание технологического объекта, рассматриваются вопросы обработки данных контрольно-измерительных приборов, структурная идентификация моделей, задача формирования набора входов для модели ВА, метод получения модели динамического ВА на основе вейвлет-преобразования. Приводятся результаты исследования выбора параметров методов идентификации статической и динамической моделей ВА.

Первым этапом получения модели, прогнозирующей качество целевого продукта процесса ректификации нефти, является обработка данных показаний контрольно-измерительных приборов, полученных с производственных объектов. Возникают следующие проблемы:

- 1) отсутствие измерений в некоторые моменты времени;
- 2) некорректная величина измерения (выброс);
- 3) несовпадение времени измерений входов и выхода.

Если при получении статической модели, каждому измерению выхода соответствует одно измерение входа и отсутствие или некорректность измерения в какой-то момент времени может не повлиять, то для динамической модели, когда измерение выхода зависит от динамики изменения входа, т.е. от нескольких измерений входа. Данная проблема может привести к необходимости исключения измерения выхода из выборки. При наличии малой выборки, данное действие приводит к сокращению выборки измерений выхода, получению модели худшего качества.

Чтобы избежать исключения измерения выхода при отсутствии (некорректности) измерения по входу, данные матрицы измерений входов обрабатываются следующим образом. Отсутствующему измерению входа присваивается предыдущее (корректное) измерение по данному входу. Если отсутствует первое измерение по входу, то первому измерению входа присваивается первое по времени известное (корректное) измерение.

Если отсутствует (некорректно) измерение выхода, то данное измерение исключается из выборки.

Для решения проблемы несовпадения времени измерений входов и выхода, измерение входов ищется в окрестности времени измерения выхода равной интервалу измерения входов.

Для данных, содержащих показания поточного анализатора, частота измерений, осуществляемая поточным анализатором, меньше частоты измерений показаний контрольно-измерительных приборов. Величина

последнего измерения поточного анализатора фиксируется до получения следующего измерения. При этом в каждый момент измерения показания входов к фиксированному показанию поточного анализатора добавляется шумовая составляющая. Необходимо извлекать отдельные измерения показателя качества продукта поточным анализатором. Для данной проблемы разработан алгоритм обработки данных.

Если  $x(i)$  - показание поточного анализатора на шаге  $i$ ,  $k$  - отношение частоты измерений входов к средней частоте измерений выхода, то для отбора показания поточного анализатора установлено выполнение следующих условий:

1)  $|x(i) - x(i-1)| < \Delta x_{\max}$  - ограничение максимального изменения показания поточного анализатора;

2)  $|x(i) - x(i-1)| > \Delta x_{\min}$  - ограничение минимального изменения;

3)  $|x(i+0.5k) - x(i)| < \Delta x_{\min}$  - фиксация величины измерения выхода;

4)  $|x(i-0.5k) - x(i+0.5k)| > \Delta x_{\min}$  - фиксация величины измерения выхода;

5)  $|x(i) - x(i+1)| < \Delta x_{\min}$  - фиксация величины измерения выхода;

6)  $|x(i) - x(i+3k)| < 2 * \Delta x_{\max}$  - ограничение изменения показания поточного анализатора на нескольких измерениях.

7)  $x(i) \neq 0$  - исключение некорректных (отсутствующих) измерений выхода.

Показания поточного анализатора, полученные с помощью алгоритма обработки данных, включаются в выборку данных выхода. Пример извлекаемых измерений представлен на рис.1.

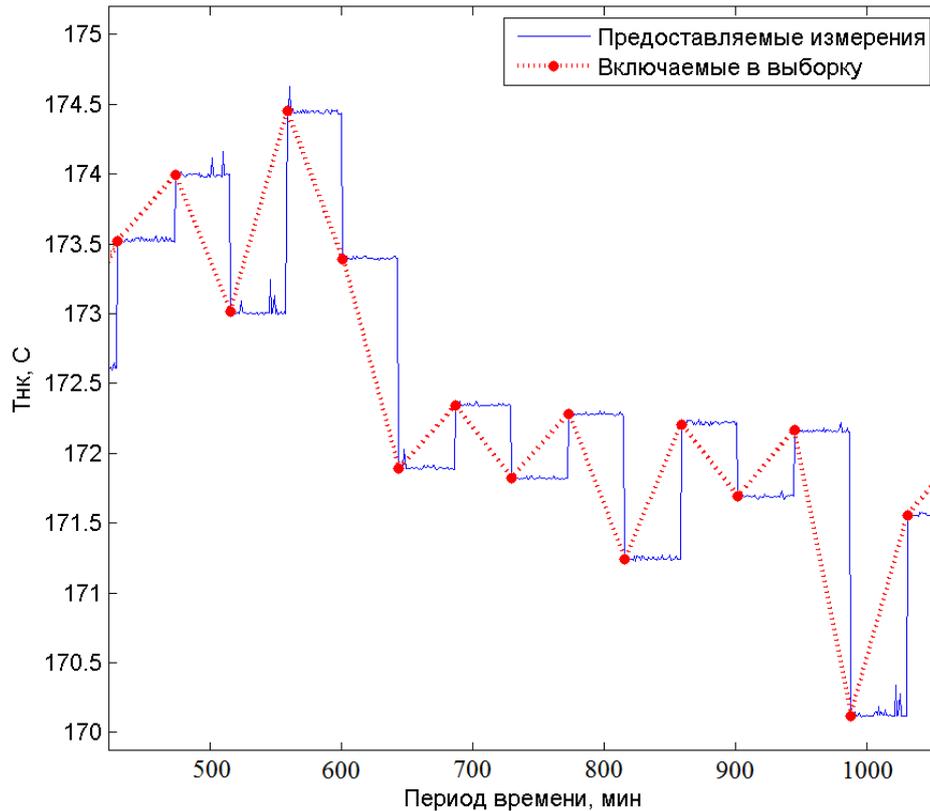


Рис. 1. Обработка показаний поточного анализатора

Для определения набора входов и параметров модели исследовались методы:

- 1) метод наименьших квадратов;
- 2) гребневая регрессия;
- 3) метод робастной регрессии;
- 4) шаговая регрессия;
- 5) метод Лассо;
- 6) проекция на скрытые структуры;

7) метод определения набора входов на основе аналитической модели процесса.

При нахождении модели ВА в виде линейной регрессионной модели:

$$y(\tau) = b_0 + b_1 u_1(\tau) + b_2 u_2(\tau) + \dots + b_N u_N(\tau), \quad (1)$$

где  $u_1, u_2, \dots, u_N$  - входы модели;  $y$  - выход модели;  $b_j$  -  $j$ -ый коэффициент модели;  $j = 0, 1, \dots, N$ ;  $b_0$  - свободный член;  $N$  - количество входных переменных;  $\tau$  - нерегулярные моменты времени измерения выхода:  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ ;  $\tau_i = \tau_{i-1} + \tau_0 + \varepsilon$ ,  $i \geq 2$ ;  $\tau_1 = \tau_0 + \varepsilon$ ;  $\tau_0$  - постоянная составляющая;  $\varepsilon$  - случайная составляющая, ограниченная определенным диапазоном.

Обозначим  $\mathbf{u} = [1, u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, u_N(\tau)]^T$  - объединенный вектор измеряемых входных переменных размерности  $(N+1)$ ,  $\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_N]^T$  - искомый вектор параметров модели той же размерности. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$y = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{b}$$

Сформировав вектор  $\mathbf{Y}$  размерности  $q$  из значений выхода у модели (1):

$$\mathbf{Y} = [y(\tau_1), y(\tau_2), \dots, y(\tau_q)]^T$$

и матрицу  $\mathbf{U}$  входов  $u_j$ , соответствующих из (1) определенному значению выхода модели в  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & u_1(\tau_1) & u_2(\tau_1) & \dots & u_N(\tau_1) \\ 1 & u_1(\tau_2) & u_2(\tau_2) & \dots & u_N(\tau_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & u_1(\tau_q) & u_2(\tau_q) & \dots & u_N(\tau_q) \end{bmatrix},$$

представим матричное уравнение в виде  $\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{b}$ .

При получении модели критическим является момент соотношения времени измерения показаний выхода с показаниями входов. Время отбора пробы для лабораторных измерений и время получения результата измерения поточным анализатором обычно содержит в себе задержку включающую время прогноза, когда изменяются значения входов до изменения значений выхода и время прохождения продуктом пути до точки отбора пробы. Данная задержка определялась с помощью:

- 1) взаимнокорреляционной функции;
- 2) перебором задержки.

В качестве параметра метода идентификации модели использовался интервал усреднения входов от соотнесенного времени измерения выхода с целью сглаживания показаний входов. Заданный интервал усреднения по входам также компенсирует разницу времени запаздывания от каждого отдельного входа, но усреднение по входам также искажает показания входов.

Для динамической модели ВА выход определяется с помощью уравнения:

$$y(\tau) = h_0 + \sum_{k=0}^{n_1-1} h_1(k+1)u_1(\tau-k) + \sum_{k=0}^{n_2-1} h_2(k+1)u_2(\tau-k) + \dots + \sum_{k=0}^{n_N-1} h_N(k+1)u_N(\tau-k), \quad (2)$$

где  $u_1, u_2, \dots, u_N$  - входы модели;  $y$  - выход модели;  $n_j$  - глубина модели по входу  $j$ ;  $j = 1, \dots, N$ ;  $N$  - количество входов;  $\tau$  - нерегулярные моменты времени фактического измерения выхода;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ ;  $\tau_i = \tau_{i-1} + \tau_0 + \varepsilon, i \geq 2$ ;  $\tau_1 = \tau_0 + \varepsilon$ ;  $\tau_0$  - постоянная составляющая;  $\varepsilon$  - случайная составляющая, ограниченная определенным диапазоном;  $h_0$  - свободный член.

Предложено использование вейвлет-преобразования для сглаживания определенных переходных характеристик.

Компоненты переходной характеристики  $\mathbf{s}$  связаны с коэффициентами импульсной характеристики  $\mathbf{h}$  соотношениями:

$$s_j(k) = \sum_{i=1}^k h_j(i), \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, \dots, n_j.$$

Преобразованная с помощью вейвлет-преобразования переходная характеристика приобретает вид:

$$\mathbf{s}_j = \sum_{i=1}^{p_r} v_{r,i} \varphi_{r,i} + \sum_{z=1}^r \sum_{i=1}^{p_z} d_{z,i} \omega_{z,i},$$

где,  $\varphi$  – скейлинг-функция,  $\omega$  – базисный вейвлет,  $v_{r,i}$ ,  $d_{z,i}$  – коэффициенты аппроксимации и детализации,  $z=1,2,\dots,r$  – уровень разложения,  $p_r$  – количество коэффициентов на уровне  $r$  разложения.

Присваивая коэффициентам детализации от первого уровня  $z$  и выше значение  $d_{z,i} = 0$ ,  $i = 1, \dots, p_z$ , из переходной характеристики удаляются все более низкочастотные составляющие.

Сглаживанием переходных характеристик с использованием вейвлет-преобразования достигается удаление высокочастотных составляющих. Тестирование предложенного метода сглаживания для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что достигается снижение среднеквадратической ошибки на проверочной выборке до 15%.

В отличие от статической модели, для динамической модели не требуется определение интервала усреднения, но добавляются дополнительные параметры: временной интервал между используемыми измерениями входов и глубина модели.

Исследования показали, что недостаточная глубина модели ухудшит качество модели, избыточная глубина модели требует большего количества измерений выхода. При уменьшении интервала между используемыми измерениями входов полученные модели лучше улавливают динамику процесса, но требует большего количества измерений выхода для определения параметров импульсных характеристик.

**В главе 3** описывается методология подготовки данных моделирования процесса на основе строгой модели процесса ректификации нефти. Приводится строгая модель атмосферного блока установки первичной переработки нефти ЭЛОУ АВТ-2 Киришского НПЗ.

Если не изменяется величина некоторого значимого входа, то матрица  $U$  становится вырожденной, что не позволяет однозначно оценить вектор коэффициентов  $\mathbf{b}$ . В реальных условиях матрица  $U$  вырожденной не становится, так как при отсутствии изменений по переменной  $u_j$  с контрольно-измерительных приборов приходит изменяющаяся за счет погрешности измерения величина, что приводит к ошибкам в оценивании  $b_j$ .

В данном случае необходима априорная информации о структуре и параметрах модели, исходя из физико-химической сущности технологического объекта. В качестве источника такой информации предлагается использовать строгую (аналитическую) модель процесса, состоящую из уравнений фазового равновесия, материального баланса и энергетического баланса.

Использование предварительно откалиброванной строгой модели процесса позволяет улучшить качество идентифицируемых ВА. В короткие сроки без технологических пробегов промышленной установки и значительных материальных затрат можно произвести перебор статических режимов работы установки и наблюдать изменения параметров процесса, показателей качества получаемых продуктов. В результате имитационного моделирования формируется выборка данных различных режимов работы установки.

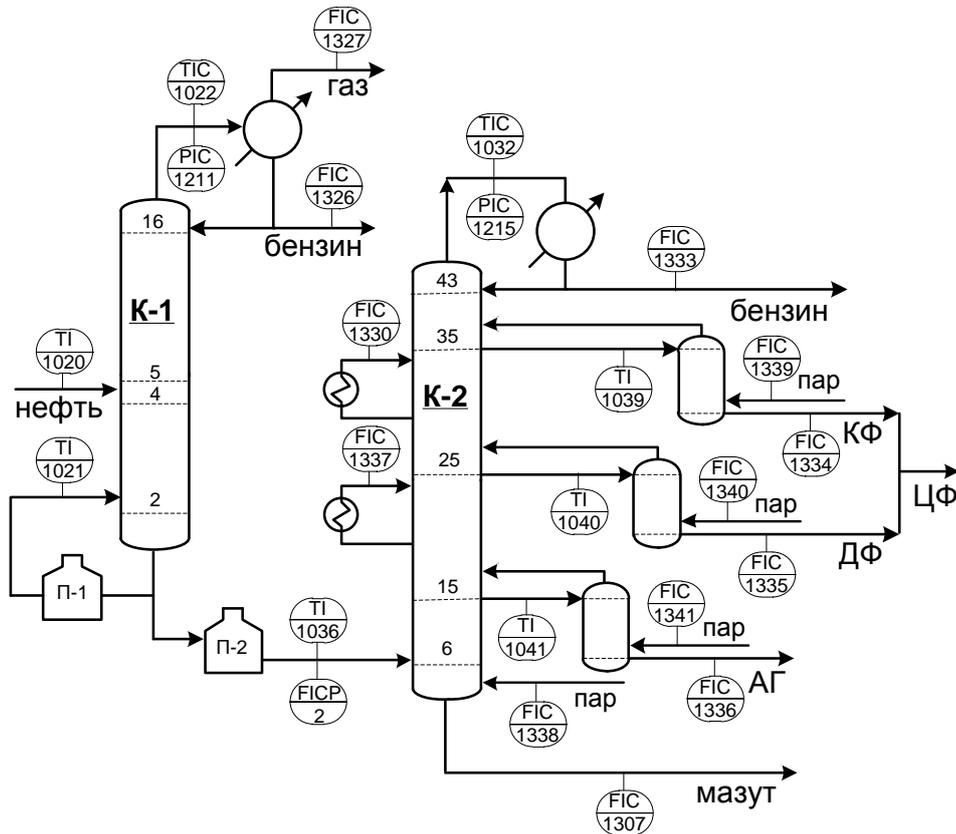


Рис. 2. Атмосферный блок установки первичной переработки нефти.

Различные режимы работы установки исследуются, как правило, в результате пошагового тестирования. По аналогии, пошаговое тестирование смоделированного технологического объекта заключается в последовательном расчете колонны с последующим сбором данных, полученных при изменении величины одного из входов для модели процесса при фиксировании значений других с добавлением в массив данных рассчитанной величины контролируемого параметра процесса, являющемся выходом модели ВА.

Получена строгая модель атмосферного блока установки первичной переработки нефти ЭЛОУ АВТ-2 Киришского НПЗ (рис.2), состоящая из системы уравнений, которая содержит уравнения фазового равновесия, материального баланса и энергетического баланса. Рассмотрены вопросы формирования массива данных на основе строгой модели.

**Глава 4** посвящена получению моделей ВА с учетом ограничений на коэффициенты модели. Полученные данные моделирования используются для определения информативных входов модели ВА, а также для формирования ограничений на параметры модели. Определяются коэффициенты передачи  $b_i^{kП} = \Delta y / \Delta u_i$ , т.е. изменение выходной переменной объекта при переходе из начального в новое установившееся состояние, отнесенное к изменению возмущения на входе модели ВА. Принцип формирования начального набора входов ВА основан на данных коэффициентах передачи.

Исходя из (1),  $u_j$   $j = 1, \dots, N$  при одном изменяемом  $u_{j=k}$ , а остальных фиксированных получаем:

$$\begin{aligned}
y(\tau + \Delta\tau) - y(\tau) &= b_0 - b_0 + b_1(u_1(\tau + \Delta\tau) - u_1(\tau)) + \dots + b_N(u_N(\tau + \Delta\tau) - u_N(\tau)) \\
\Delta y(\tau + \Delta\tau) &= b_k \Delta u_k(\tau + \Delta\tau) \\
b_k &= \Delta y(\tau + \Delta\tau) / \Delta u_k(\tau + \Delta\tau) = b_k^{KП}
\end{aligned}$$

При зависимости нескольких входов модели ВА, например  $u_{k1}$  и  $u_{k2}$ , и фиксации остальных получаем систему:

$$\begin{aligned}
\Delta y(\tau_1 + \Delta\tau) &= b_{k1} \Delta u_{k1}(\tau_1 + \Delta\tau) + b_{k2} \Delta u_{k2}(\tau_1 + \Delta\tau) \\
\Delta y(\tau + \Delta\tau) &= b_{k1} \Delta u_{k1}(\tau + \Delta\tau) + b_{k2} \Delta u_{k2}(\tau + \Delta\tau) = b_{k1}^{KП} \Delta u_{k1}(\tau + \Delta\tau) \\
b_{k1}^{KП} &= b_{k1} + b_{k2} \Delta u_{k2}(\tau + \Delta\tau) / \Delta u_{k1}(\tau + \Delta\tau)
\end{aligned}$$

При использовании данных пошагового тестирования промышленной установки учет ограничений осуществляется на коэффициенты передачи. Решается задача о наименьших квадратах с ограничениями на переменные:

$$\begin{aligned}
\min(\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{b})^2 \\
\mathbf{A}\mathbf{b} \geq \hat{\mathbf{b}}
\end{aligned}$$

где  $\hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}^{KП \min} \\ -\mathbf{b}^{KП \max} \end{bmatrix}$ ,  $\bar{\mathbf{Y}}$  – фактическое измерение выхода.

Предполагается получение коэффициентов передачи по всем возможным входам с целью дальнейшего исключения неинформативных, коррелирующих.

Начальный набор входов ВА определяется по величине изменения выхода  $|\Delta y| > \delta$ , полученной при получении коэффициента передачи  $b_i^{KП}$ , где  $\delta$  – заданная малая положительная величина.

Далее, для полученного итогового набора входов для данных моделирования, методом гребневой регрессии определяется статическая модель ВА, производится корректировка набора входов с целью исключения неинформативных, коррелирующих. Получается окончательная модель статического ВА для данных моделирования.

Незначительность вклада  $y_i(\tau)$  входа  $u_i$  (неинформативность) определяется с помощью критерия, полученного на основании уравнения (1):

$$\sum_{\tau=1}^M |y_i(\tau) - y_i^a| / M = \sum_{\tau=1}^M |b_i(u_i(\tau) - u_i^a)| / M < \delta, \quad (3)$$

где  $y_i^a$ ,  $u_i^a$  – средние значения  $y_i$ ,  $u_i$ ;  $M$  – число измерений выхода;  $\delta$  – заданная малая положительная величина.

На основании параметров полученной модели оценивается диапазон изменения параметров статического ВА  $[\mathbf{b}^{\min}, \mathbf{b}^{\max}]$  для промышленных данных:

$$\begin{aligned}
\mathbf{b}^{\min} &= \mathbf{b} - x|\mathbf{b}| \\
\mathbf{b}^{\max} &= \mathbf{b} + x|\mathbf{b}|,
\end{aligned} \quad (4)$$

где  $x$  – доля расширения окрестности от номинального значения параметра ВА для данных строго моделирования,  $\mathbf{b}$  – оценка параметров статической модели, полученной на данных моделирования. Исследования показали, что значение  $x$

находится в интервале  $[0,1 \div 0,5]$  для моделей процессов первичной переработки нефти и выбирается разработчиком.

При получении статической модели, используя ограничения (4), для промышленных данных методом активного набора решается задача минимизации целевой функции с линейными ограничениями-неравенствами:

$$\min_{\mathbf{b}^{\min} \leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}^{\max}} (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{b})^2$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}^{\min} \\ -\mathbf{b}^{\max} \end{bmatrix}.$$

которые приводятся к виду  $\mathbf{A}\mathbf{b} \geq \hat{\mathbf{b}}$ , где

Таким образом, в условиях малого диапазона изменений входов, выхода, ограниченности выборки промышленных данных параметры модели определяются, исходя из физико-химической сущности технологического процесса.

Разработан алгоритм (рис. 3) получения статических моделей ВА процесса первичной переработки нефти с учетом ограничений на коэффициенты модели.

Тестирование предложенного алгоритма для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что снижение среднеквадратической ошибки на проверочной выборке может составлять не менее 43%.

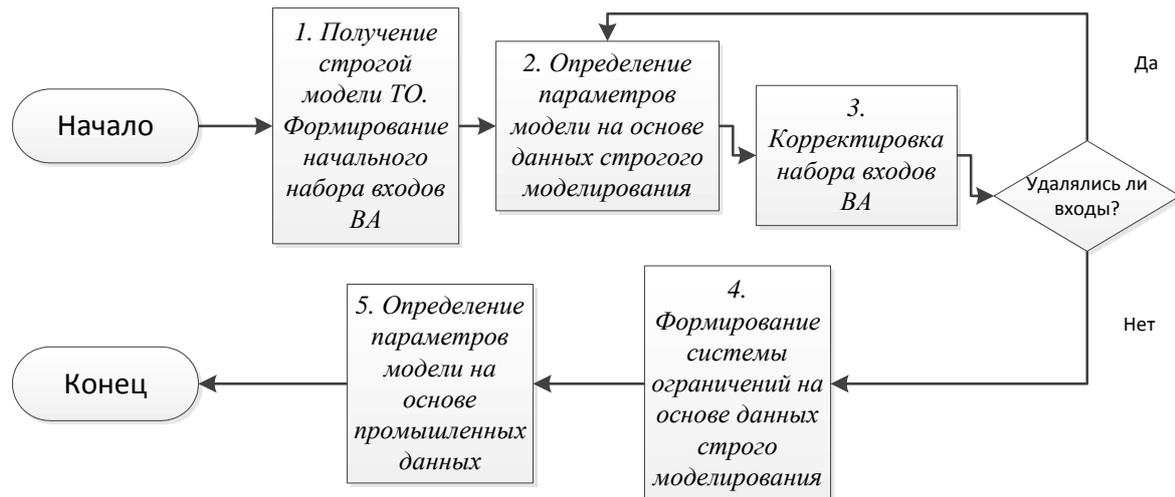


Рис. 3. Блок-схема алгоритма идентификации статического ВА

Разработан алгоритм получения динамических моделей ВА процесса первичной переработки нефти с учетом ограничений на коэффициенты модели, схема которого приведена на рис. 4.

При получении динамической модели минимизируется целевая функция:

$$\Psi = \mathbf{E}^2 = (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{U}\mathbf{h})^2. \quad (5)$$

с учетом ограничения на коэффициенты переходной характеристики  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{s}^{\min} \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{s}^{\max}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{s} = [s_1(1), \dots, s_1(n_1), \dots, s_N(1), \dots, s_N(n_N)]^T$ ;  $\mathbf{s}^{\min} = [s_1^{\min}, \dots, s_N^{\min}]^T$ ;  $\mathbf{s}^{\max} = [s_1^{\max}, \dots, s_N^{\max}]^T$ .

Выбираются параметры для формирования системы ограничений (6):

$a_1$  – от какой доли глубины модели  $n_j$  начнется схождение значений коэффициентов векторов ограничений  $s_j^{\min}$ ,  $s_j^{\max}$  переходной характеристики  $s_j$  к  $b_j^{\min}$ ,  $b_j^{\max}$ .

$a_2$  – с какой доли  $b_j^{\min} > 0$  ( $b_j^{\max} < 0$ ) начинается постепенное увеличение (уменьшение) значений коэффициентов  $s_j^{\min}$  ( $s_j^{\max}$ ).

$a_3$  – с какой доли  $b_j^{\max} > 0$  ( $b_j^{\min} < 0$ ) начинается постепенное уменьшение (увеличение) значений коэффициентов  $s_j^{\max}$  ( $s_j^{\min}$ ).

Для  $b_j > 0$ :

$$\mathbf{s}_j^{\min} = \begin{bmatrix} s_j^{\min}(1) = 0 \\ \vdots \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j)) = 0 \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j) + 1) = b_j^{\min} \left( a_2 + (1 - a_2) \left( 1 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j) + 2) = b_j^{\min} \left( a_2 + (1 - a_2) \left( 2 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ \vdots \\ s_j^{\min}(n_j) = b_j^{\min} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s}_j^{\max} = \begin{bmatrix} s_j^{\max}(1) = a_3 b_j^{\max} \\ \vdots \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j)) = a_3 b_j^{\max} \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j) + 1) = b_j^{\max} \left( 1 + (a_3 - 1) \left( 1 - 1 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j) + 2) = b_j^{\max} \left( 1 + (a_3 - 1) \left( 1 - 2 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ \vdots \\ s_j^{\max}(n_j) = b_j^{\max} \end{bmatrix},$$

для  $b_j < 0$

$$\mathbf{s}_j^{\min} = \begin{bmatrix} s_j^{\min}(1) = a_3 b_j^{\min} \\ \vdots \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j)) = a_3 b_j^{\min} \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j) + 1) = b_j^{\min} \left( 1 + (a_3 - 1) \left( 1 - 1 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ s_j^{\min}(\text{fl}(a_1 n_j) + 2) = b_j^{\min} \left( 1 + (a_3 - 1) \left( 1 - 2 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ \vdots \\ s_j^{\min}(n_j) = b_j^{\min} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s}_j^{\max} = \begin{bmatrix} s_j^{\max}(1) = 0 \\ \vdots \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j)) = 0 \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j) + 1) = b_j^{\max} \left( a_2 + (1 - a_2) \left( 1 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ s_j^{\max}(\text{fl}(a_1 n_j) + 2) = b_j^{\max} \left( a_2 + (1 - a_2) \left( 2 / (n_j - \text{fl}(a_1 n_j)) \right) \right) \\ \vdots \\ s_j^{\max}(n_j) = b_j^{\max} \end{bmatrix},$$

где  $\text{fl}$  – округление до ближайшего в сторону  $-\infty$ .

На рис. 5 показан пример определенного  $s_j$  при  $b_j > 0$ , при ограничениях  $s_j^{\min}$  и  $s_j^{\max}$ . Были выбраны параметры  $a_1 = 0,5$ ,  $a_2 = 0,5$ ,  $a_3 = 1,2$ .

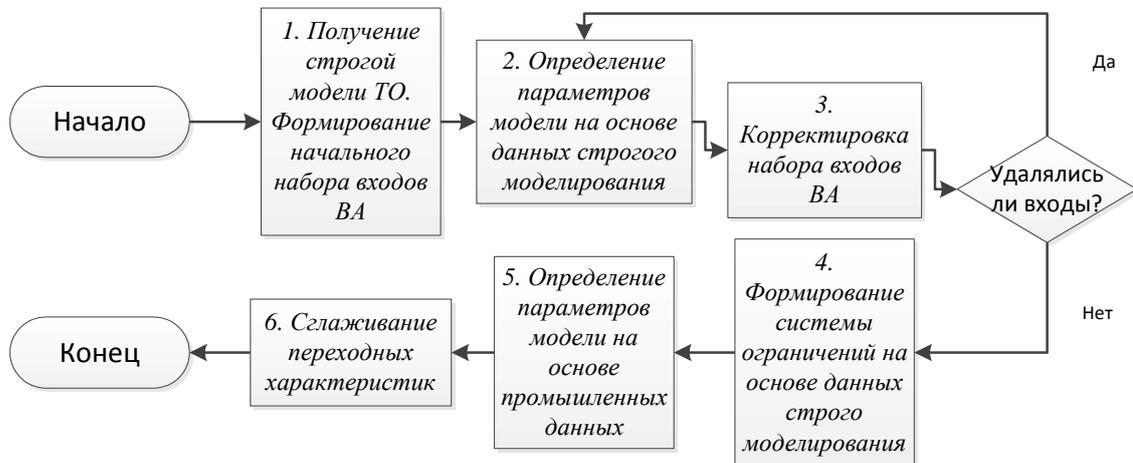


Рис. 4. Блок-схема алгоритма идентификации динамического ВА

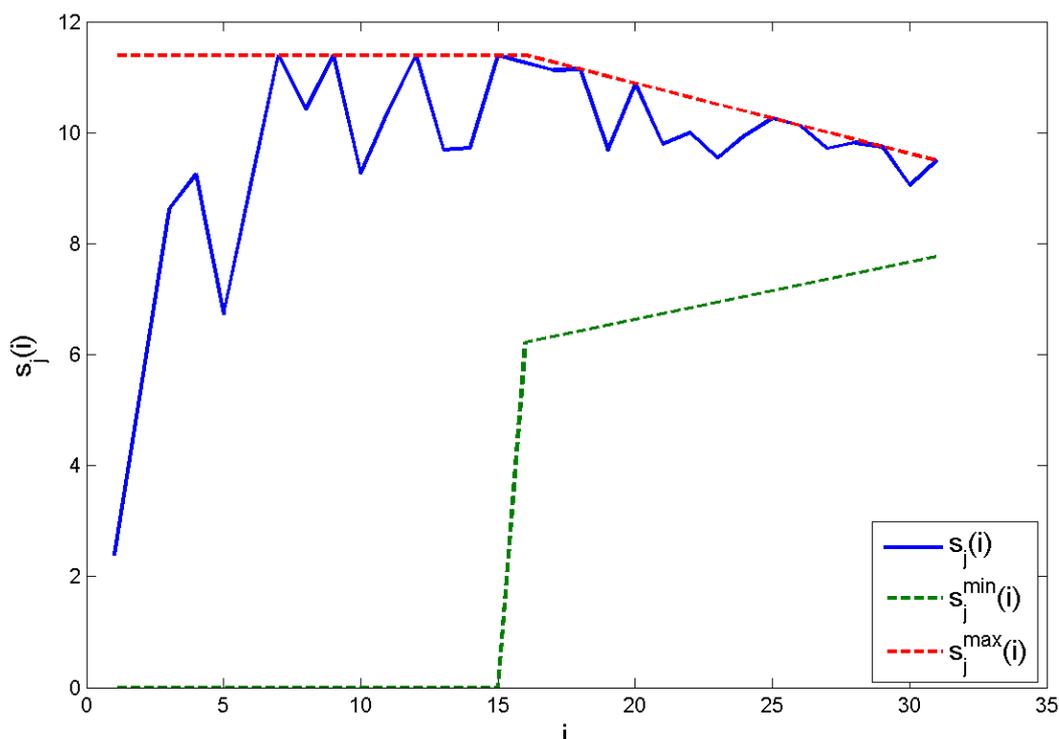


Рис. 5. Результат применения ограничений

Ограничения (6) приводим к виду:

$$\mathbf{A}\tilde{\mathbf{h}} \geq \hat{\mathbf{s}}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} h_1(1) \\ \vdots \\ h_1(n_1) \\ \vdots \\ h_N(1) \\ \vdots \\ h_N(n_N) \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}^{\min} \\ -\mathbf{s}^{\max} \end{bmatrix}.$$

Для промышленных данных решается задача минимизации целевой функции (5) с ограничениями (7). Решение находится методом активного набора. Тестирование предложенного алгоритма для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что снижение среднеквадратической ошибки на проверочной выборке может составлять не менее 38%.

**В главе 5** рассматривается разработанное приложение для определения параметров статического ВА с учетом ограничений, программа «Расчёт параметров модели виртуального анализатора с учетом ограничений».

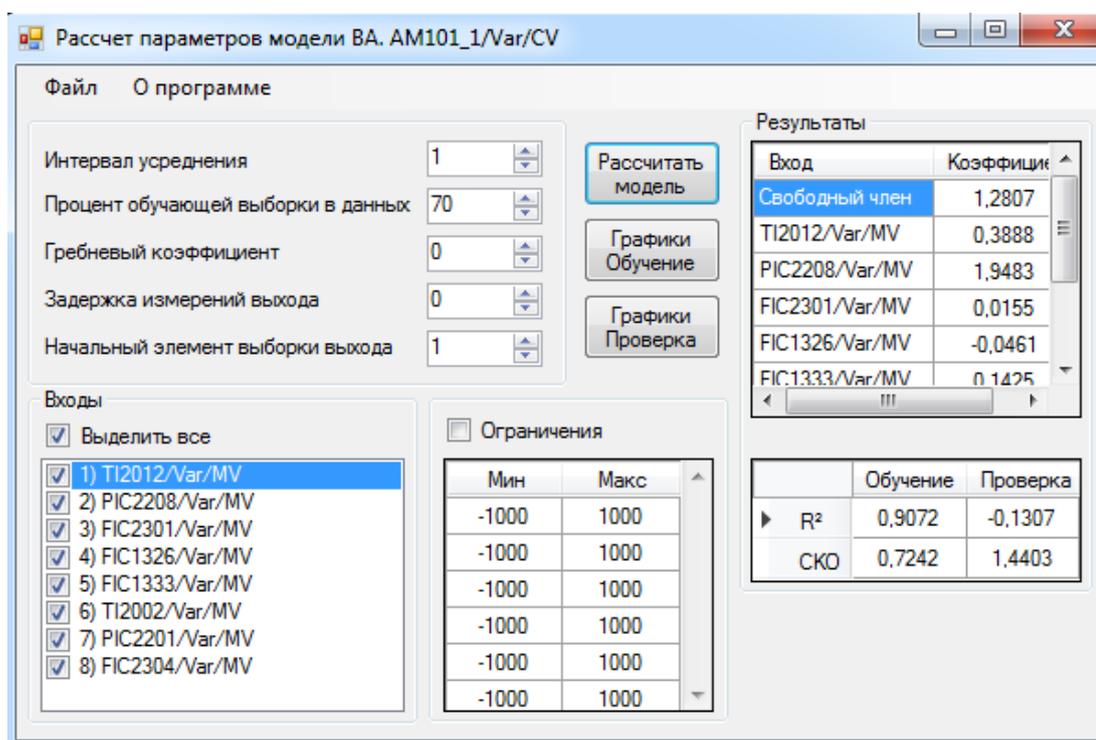


Рис. 6. Интерфейс программы расчета ВА.

Программа «Расчёт параметров модели виртуального анализатора с учетом ограничений» предназначена для определения параметров линейной регрессионной модели, используемой для прогнозирования качества, полученных в результате ректификации продуктов. Учет ограничений позволяет учесть физико-химические особенности технологического процесса, получить более качественные модели ВА. Интерфейс программы представлен на рис. 6.

Программа позволяет подгрузить данные контрольно-измерительных приборов, данные измерений качества продукта. Осуществляется обработка подгруженных данных.

В форму программы вынесены параметры метода, используемые при определении параметров модели и влияющие на качество полученной модели:

1. Интервал усреднения.
2. Процент обучающей выборки в данных.
3. Гребневый коэффициент.
4. Задержка измерений выхода.
5. Начальный элемент выборки выхода.

*Выбор входов.*

С помощью области программы «Входы» из загруженного списка входов можно выбирать входы, которые будут использоваться в модели.

*Ограничения на параметры.*

Использование ограничений при расчете параметров модели зависит от наличия галочки рядом с текстом «Ограничения». В области программы, где вводятся ограничения, выбор строки приводит к выбору и соответствующей строки входа, для которого устанавливается ограничение.

*Запуск вычислений.*

Вычисления модели происходят при загрузке данных измерений входов и выхода и нажатии кнопки «Рассчитать модель».

*Результаты вычислений программы.*

Результаты вычислений программы выводятся в области «Результаты». Результатами являются полученные значения коэффициентов модели и показатели качества полученной модели ( $R^2$  – коэффициент детерминации и  $СКО$  – среднеквадратическая ошибка на обучающей и проверочной выборках). Полученные коэффициенты модели можно сохранить через Меню Файл/Сохранить модель (Файл/Сохранить модель как).

*Построение графиков.*

При получении модели можно построить графики, на которых будут отображены измерения выхода и прогнозируемые значения выхода, полученные на модели. Возможно построение графиков для обучающей выборки (кнопка «Графики Обучение») и проверочной выборки (кнопка «Графики Проверка»). Есть возможность выделять (с помощью мыши), приближать и прокручивать области графиков. Полученные графики можно сохранить через Меню Файл/Сохранить (Файл/Сохранить как).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен метод определения набора входов для ВА. Он основан на использовании данных пошагового тестирования, полученных на основе строгой (аналитической) модели процесса. Показано, что использование данного метода наиболее эффективно в условиях малой обучающей выборки. Тестирование предложенного алгоритма для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что снижение среднеквадратической ошибки значений выхода ВА на проверочной выборке может составлять более 28 % по сравнению с традиционными методами определения входов модели.
2. Предложен метод сглаживания переходных характеристик ВА с использованием вейвлет-преобразования. Тестирование предложенного метода сглаживания для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что снижение среднеквадратической ошибки прогнозных значений выхода ВА на проверочной выборке может составлять до 15 %.
3. Разработаны алгоритмы идентификации статических и динамических моделей, прогнозирующих качество получаемых продуктов, с учетом ограничений на параметры модели, сформированных на основе данных строгого моделирования технологического процесса. Тестирование предложенных алгоритмов для объектов промышленной установки первичной переработки нефти показало, что снижение среднеквадратической ошибки на проверочной выборке может составлять не менее 43 %, что позволяет увеличить отбор светлых продуктов до 0,5 % за счет улучшения точности ВА.
4. Ввод ограничений на параметры модели, полученных на основе данных строгого моделирования технологического процесса, обеспечивает использование априорной информации о структуре и параметрах модели, исходя из физико-химической сущности технологического объекта в условиях обучающей выборки недостаточного объема и при наличии погрешности измерений, искажающих оценки параметров моделей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Использование вейвлетов при построении моделей объектов управления с нерегулярным измерением выхода / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2013. – № 1 (35) . – С. 16-25.
2. Параметрическая идентификация динамического объекта с переменной задержкой измерения выхода / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Информатика и системы управления. – 2014. – № 2 (40). – С. 94-101.
3. Идентификация параметров моделей динамических виртуальных анализаторов технологических объектов управления / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 31-33.
4. Использование системы ограничений на параметры прогнозирующих моделей при идентификации массообменных технологических объектов / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – № 1. – С. 25-34.
5. Гончаров, А. А. Идентификация массообменных технологических объектов с учетом ограничений на параметры модели / А. А. Гончаров, А. Ю. Торгашов, И. В. Жуков // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 6. – С. 34-38.
6. Гончаров, А. А. Использование имитационного моделирования в задаче идентификации массообменного технологического объекта / А. А. Гончаров, А. Ю. Торгашов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2016. – № 2. – С. 23-30.
7. Торгашов, А. Ю. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами. / А. Ю. Торгашов, А. А. Гончаров, С. А. Самотылова // Вестник ДВО РАН. – 2016. – № 4 (188). – С. 102-107.

### Публикации в изданиях базы данных Scopus

8. Goncharov, A. Application of active set method for soft sensor model identification of crude oil distillation process / A. Goncharov, A. Torgashov // Proc. DOOR 2016. – 2016. – CEUR-WS, Vol. 1623. – P. 723 732.

### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

9. А.с. 2016610212 Российская Федерация. Расчёт параметров модели виртуального анализатора с учетом ограничений [Текст] / Гончаров А. А., Торгашов А. Ю. – 2015660679; заявлено 09.11.15; опублик. 11.01.16. – С. 1.

**Другие публикации результатов диссертационного исследования**

10. Goncharov, A. A. An application of wavelets for predictive models identification of the plants with variable sample rate of outputs / A. A. Goncharov, A. Yu. Torgashov // Materials of International Conference on Wavelets and Applications. St. Petersburg. Russia. – 2012. – P. 38-39.
11. Применение вейвлетов для идентификации объектов управления с нерегулярным измерением выхода / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Сборник докладов XXXVI Дальневосточной математической школы-семинара имени академика Е. В. Золотова. – 2012. – С. 462-469.
12. Идентификация параметров многомерного динамического объекта с нерегулярным измерением выхода / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Сборник докладов XXXVII Дальневосточной математической школы-семинара имени академика Е. В. Золотова. – 2013. – С. 52-57.
13. Идентификация параметров многомерного динамического объекта с нерегулярным измерением выхода / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Сборник трудов XII Всероссийского совещания по проблемам управления. – 2014. – С. 2787-2794.
14. Идентификация моделей с ядрами Вольтерра в условиях действия внешних неизмеряемых возмущений / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Сборник докладов XXXVIII Дальневосточной математической школы-семинара имени академика Е. В. Золотова. – 2014. – С. 512-519.
15. Идентификация технологических объектов управления с учетом ограничений на коэффициенты модели / А. А. Гончаров, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ –28: сб. трудов XXVIII Международ. науч. конф. – 2015. – С. 16-20.
16. Гончаров, А. А. Разработка моделей виртуальных анализаторов процесса первичной переработки нефти с учетом ограничений на коэффициенты модели / А. А. Гончаров, А. Ю. Торгашов // Нефтепереработка – 2016: сб. докладов Международ. научно-практич. конф. – 2016. – С. 203-204.
17. Гончаров, А. А. Разработка динамических виртуальных анализаторов атмосферной колонны фракционирования нефти с учетом параметрических ограничений / А. А. Гончаров, А. Ю. Торгашов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ –29: сб. трудов XXIX Международ. науч. конф. – 2016. – Т. 3. – С. 114-115.

Подписано в печать. Формат 60×84/16  
Бумага типографская. Печать офсетная.  
Усл. печ. лис. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ.

---

Издательство