

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУППЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

В статье рассмотрена динамическая оптимизация сложных технологических процессов на примере процесса гидроочистки дизельного топлива. Целью исследования является создание системы оптимизации группы технологических установок в реальном времени. Актуальность исследования определяется тем, что существующие системы оптимального управления решают задачи локальной оптимизации одного технологического процесса, а не задачу глобальной оптимизации цепочек установок нефтеперерабатывающего предприятия. Также существует проблематика отсутствия интеграционного решения между системами оптимального планирования и системами управления технологическими установками. В качестве интеграционной системы предлагается использование системы оптимизации группы технологических установок, согласно иерархии систем управления нефтеперерабатывающим предприятием, рассмотренной в данной статье. В рамках исследования была проведена идентификация технологического процесса для получения математической модели нескольких установок различной мощности при помощи применения методов регрессионного анализа исторических данных. Модель была оценена при помощи статистических оценок и удовлетворяет требованиям точности и адекватности. В результате исследования была рассчитана математическая модель гидроочистки для решения задачи минимизации потребления энергоресурсов при соблюдении ограничения по качеству продукции. Качество полученной модели подтверждает, что создание системы оптимизации группы технологических установок в реальном времени возможна, а модель может быть использована в динамической оптимизации цепочки производства дизельного топлива.

**Ключевые слова:** системы усовершенствованного управления технологическим процессом, математическое моделирование процесса гидроочистки дизельного топлива, идентификации технологического процесса, регрессионный анализ, оптимизация группы установок.

**Введение.** Динамическая оптимизация сложных технологических процессов реализуема с помощью нескольких подходов, но наиболее эффективным является их совмещение:

— применение систем автоматического регулирования с оптимальной структурой и параметрами, обеспечивающими оптимальное, в заданном смысле, качество управления;

— выбор управляющих воздействий с помощью решения задачи оптимизации в реальном времени.

Практически все существующие установки нефтепереработки и нефтехимии, с математической

точки зрения, являются многосвязными объектами управления и, следовательно, требуют применение методов теории многосвязного регулирования для обеспечения оптимального качества управления. Классическим решением задачи оптимального регулирования на производстве является внедрение систем усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП). Advanced process control (APC) или СУУТП вошел в употребление в 1960-х, изначально под ним понимался любой алгоритм управления или стратегия, которая отличалась от ПИД-регулирования. Сегодня СУУТП



Рис. 1. Иерархия систем управления

охватывает множество технологий и методов управления, однако чаще всего используются методы управления по прогнозной модели, а также применяются виртуальные анализаторы качества [1]. Место СУУТП в иерархии систем управления нефтеперерабатывающим заводом представлено на рис. 1.

Необходимо понимать, что СУУТП разрабатывается и внедряется под определенный технологический процесс, учитывает его специфику и динамику. Однако технологические установки нефтеперерабатывающего завода тесно взаимосвязаны и представляют собой как звенья цепочки по выпуску продукта определенной номенклатуры, так и группы однородных технологических процессов [2]. На рис. 2 представлена поточная схема типового нефтеперерабатывающего завода.

Вследствие описанных выше причин, СУУТП решает задачу локальной оптимизации одной установкой, что в масштабах завода может не иметь экономического эффекта или вовсе нести отрицательный характер. Поэтому необходимо создание системы оптимизации группы технологических процессов [3].

**Постановка задачи.** Рассмотрим оптимизацию группы однородных технологических процессов на примере процесса гидроочистки дизельных топлив. Сущность процесса гидроочистки состоит в превращении соединений, содержащих серу, азот, кислород и дальнейшем гидрировании их на катализаторе с образованием летучих сернистых, азотистых, кислородсодержащих соединений (сероводорода, аммиака, воды), которые удаляются путем отпарки в ректификационных колоннах. Одновременно происходит насыщение непредельных углеводородов, частичное гидрирование полициклических ароматических углеводородов. Кроме того, протекают реакции изомеризации парафиновых, нафтеновых углеводородов, а также реакции гидрокрекинга [4].

На рис. 3 представлена типовая технологическая схема процесса гидроочистки дизельного топлива. Основными параметрами, характеризующими процесс гидроочистки, является:

— температура сырья на входе в реактор гидроочистки;

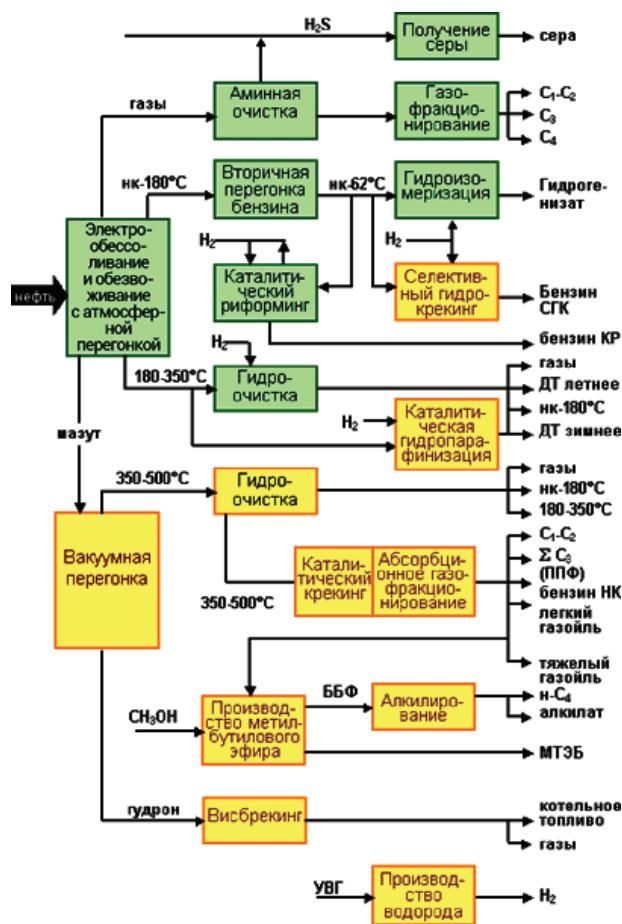


Рис. 2. Поточная схема типового нефтеперерабатывающего завода

— давление в реакторе гидроочистки;  
— объемная скорость подачи сырья;  
— кратность циркуляции водородсодержащего газа.

Основным показателем качества продукта технологического процесса гидроочистки дизельных топлив является параметр «Содержание серы в гидроочищенном дизельном топливе». За счет

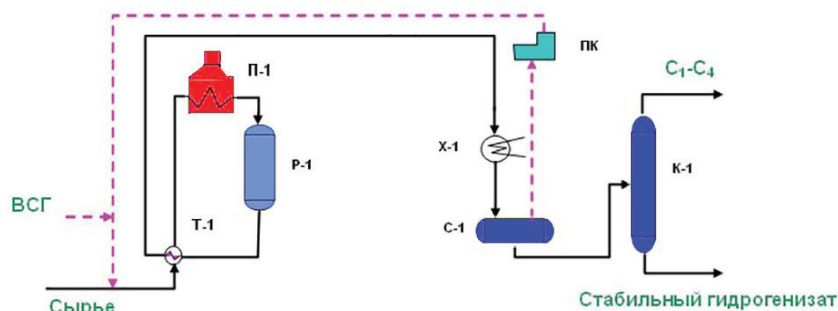


Рис. 3. Технологическая схема гидроочистки дизельного топлива

снижения запаса по качеству данного параметра (приближение к нормам) осуществляется минимизация потребления топливного газа на установку, тем самым повышается эффективность процесса.

Рассмотрим построение математической модели для глобальной оптимизации группы установок гидроочистки с различной мощностью для решения следующих задач:

- минимизация потребления топливного газа;
- соблюдение норм на показатели качества продукции;
- соблюдение планового задания на выработку продукции.

**Методы исследования.** Для построения математической модели необходимо произвести идентификацию технологических процессов выбранных установок на исторических данных работы. Основные методы определения взаимосвязей параметров представляют собой широкий спектр традиционных алгоритмов анализа данных.

С точки зрения классического математического аппарата, используются методы [5]:

- метод наименьших квадратов;
- робастная регрессия;
- проекции на латентные структуры;
- алгоритм АСЕ.

Данные алгоритмы представляют собой аппарат для построения моделей объектов при помощи регрессионного и корреляционного анализа. Одной из основных задач корреляционного анализа является поиск зависимостей между значениями случайных величин. Взаимосвязи между данным величинами, при которых одному значению одного аргумента отвечает одно или множество вполне определенных значений другой величины, называется однозначной или многозначной зависимостью. Вероятностной зависимостью называется связь между величинами, при которых каждому значению одной величины принадлежит с определенной вероятностью множество возможных значений другой величины [6].

Адекватность модели определяет соответствие модели исходным данным и статистическую значимость уравнения регрессии. Коэффициента Фишера оценивает адекватность регрессионной модели:

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m (y'_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

Критерий Фишера представляет собой соотношение суммы квадратов отклонений, исходящих из регрессии, к сумме квадратов отклонений

по отношению к регрессии. В оценке точности моделей, основанных на регрессионном анализе с одной входной переменной, используется коэффициент корреляции Пирсона ( $r_{xy}$ ). Для расчета необходимо использовать формулу:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Коэффициент корреляции описывает тесноту связи между входной и выходной переменной. Диапазон распределения коэффициента корреляции лежит в пределах от  $[-1; +1]$ . При увеличении коэффициента корреляции увеличивается связь между входной и выходной переменной.

Основными шагами интерпретации являются [7]:

1. Анализ знаков перед коэффициентами регрессии.

В данном случае определяется степень влияния входной переменной на отклик системы. Опираясь на опыт экспертов, а также на исследования в данной области, можно сделать вывод об адекватности модели и возможности предсказания процесса с ее помощью.

2. Анализ значений коэффициентов регрессии.

При необоснованно больших или малых значениях можно сделать вывод, что были допущены ошибки в расчетах и модель не пригодна к использованию.

3. Анализ расчета выхода модели.

При помощи графика можно визуальную оценить поведение модели и сделать оценку ее точности и адекватности. Если модель не повторяет исходные данные, то она не пригодна для описания и предсказания поведения объекта.

В рамках данного исследования будет использован метод робастной регрессии в виде редких и больших выбросов в исходных данных для моделирования [8].

**Результаты исследования.** В результате анализа технологического процесса была получена математическая модель для оптимизации технологического процесса.

Целью оптимизации является снижение потребления топливного газа на печах за счет перераспределения загрузки установок в сторону эффективного технологического режима при соблюдении границ по качеству продукта. Система уравнений для решения задачи оптимизации представлена ниже:

$$f(F_1, F_{1..5}, T_{1..3}, A_{1..4}, \lambda, \delta) = \begin{cases} k_1 \cdot F_1 + k_2 \cdot T_1 + k_3 \cdot T_2 + b_1 = F_2 \\ k_4 \cdot F_1 + k_5 \cdot T_1 + k_6 \cdot F_3 + k_7 \cdot A_1 + b_2 = A_2 \\ k_8 \cdot F_4 + k_9 \cdot T_3 + k_{10} \cdot T_2 + b_3 = F_5 \\ k_{11} \cdot F_4 + k_{12} \cdot T_3 + k_{13} \cdot F_6 + k_{14} \cdot A_3 + b_4 = A_4 \\ F_1 + F_4 = F_7 \\ F_2 + F_5 = F \\ \lim_{t \rightarrow \infty} F_7 = \lambda \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (A_2 = A_2) = \delta \\ f(F) \rightarrow \min, \text{ при } A_2, A_4 \rightarrow \delta \end{cases} \quad (3)$$

В табл. 1 представлены переменные системы уравнений.

Для определения коэффициентов в системе уравнений используем метод робастной регрессии, описанный выше. На рис. 4–6 представлены результаты идентификации технологического процесса с применением робастной регрессии.

На рис. 7 показана модель содержания серы в продукте и измеренный показатель качества с применением лабораторных методов.

В табл. 2 представлены статистические оценки модели.

Таблица 1

Входные и выходные переменные модели

Переменная неравенства	Описание
$F_1$	Расход сырья на установку 1
$F_2$	Расход топливного газа в печь установки 1
$F_3$	Расход ВСГ в сырье установки 1
$F_4$	Расход сырья на установку 2
$F_5$	Расход топливного газа в печь установки 2
$F_6$	Расход ВСГ в сырье установки 2
$F_7$	Суммарная загрузка установок
$F$	Суммарное потребление топливного газа
$T_1$	Температура сырья реактора гидроочистки установки 1
$T_2$	Температура окружающей среды
$T_3$	Температура сырья реактора гидроочистки установки 2
$A_1$	Содержание серы в сырье на установку 1
$A_2$	Содержание серы в гидроочищенном дизельном топливе установки 1
$A_3$	Содержание серы в сырье на установку 2
$A_4$	Содержание серы в гидроочищенном дизельном топливе установки 1
$\lambda$	Плановая загрузка установок
$\delta$	Ограничение на качество продуктов

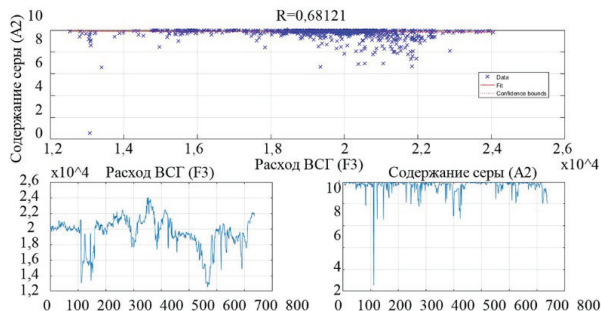


Рис. 4. Зависимость между «Расход ВСГ в сырье установки 1» и «Содержание серы в гидроочищенном дизельном топливе установки 1»

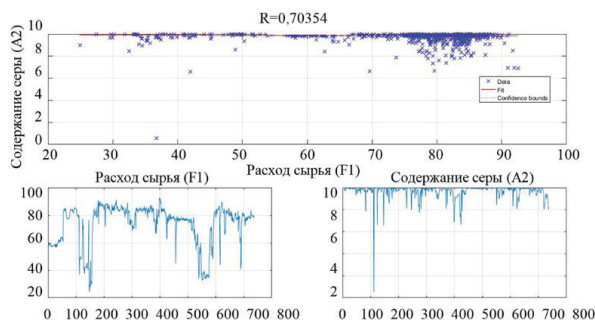


Рис. 5. Зависимость между «Расход сырья на установку 1» и «Содержание серы в гидроочищенном дизельном топливе установки 1»

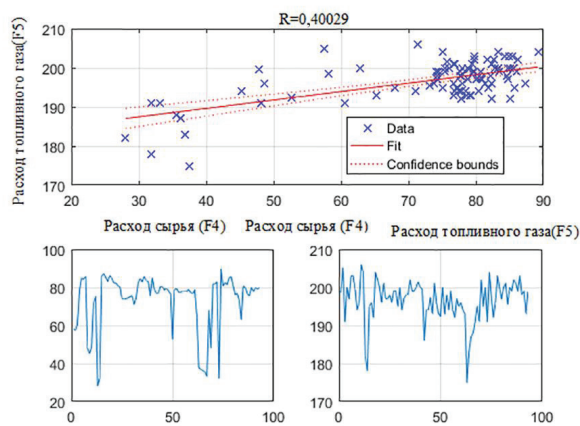


Рис. 6. Зависимость между «Расход сырья на установку 2» и «Расход топливного газа в печь установки 2»

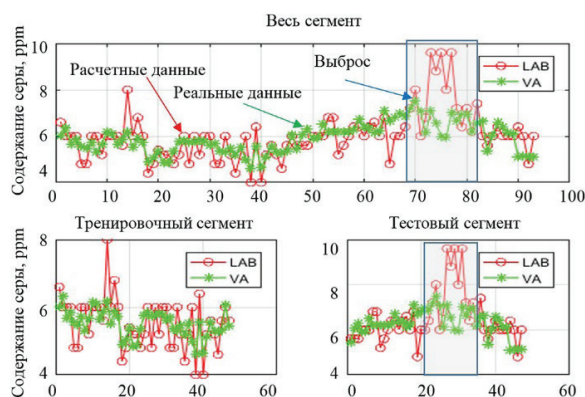


Рис. 7. Модель содержания серы в продукте

Оценка качества модели

Параметр	Модель содержания серы
RMSE	0,28
Sigma	0,28
Index	16,5

Для определения адекватности модели используем следующие статистические оценки [9]:

— RMSE — среднеквадратическая ошибка прогноза, которая фиксирует влияния смещения и среднеквадратическое отклонение;

— Sigma — среднеквадратическое отклонение, которое фиксирует распределение ошибки. Данный параметр не должен превышать воспроизводимость лабораторного анализа;

— Index — соотношение между среднеквадратической ошибкой прогноза и дисперсией выхода.

**Обсуждение результатов.** В результате идентификации технологического процесса была получена математическая модель для оптимизации работы установок гидроочистки в реальном времени. Дальнейшим этапом исследования является выбор алгоритма для решения задачи оптимизации топливного газа с учетом ограничения по качеству продукции и планом производства, проверка результатов оптимизации на реальном технологическом процессе или на модели в среде строгого моделирования. Данная задача может быть решена с использованием метода Лагранжа [10].

**Заключение.** В статье рассмотрена иерархия систем управления для нефтеперерабатывающего предприятия. Одной из основных проблем данных систем управления является отсутствие прямой связи между системами оптимального планирования и системами управления технологическими процессами. Решением изложенной проблемы является создание системы оптимизации группы однородных и разнородных процессов. В результате исследования была получена математическая модель, с применением методов идентификации, для однородных процессов (гидроочистка дизельного топлива). Модель была оценена при помощи статистических оценок и удовлетворяет требованиям точности и адекватности. Дальнейшим этапом исследования является решение задачи оптимизации потребления топливного газа с применением полученной математической модели и различных алгоритмов оптимизации, проверка результатов решения на реальном технологическом процессе.

1. Friedman Y. Z. HP Control: alkylation product separation control // Hydrocarbon processing. September 2008. P. 178.
2. Beerbaum A., Geddes D. Increase your margin by 25 % // Hydrocarbon processing. October 2010. P. 41 – 47.
3. Shokri S., Hayati R., Marvast M. A. [et al.]. Real time optimization as a tool for increasing petroleum refineries profits // Petroleum & Coal. 2009. Vol. 51, Issue 2. P. 110 – 114.
4. Tataurshikov A., Ivanchina E., Krivtsova N. [et al.]. Mathematical modeling of diesel fuel hydrotreating // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Sci. 27. 2015. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012046.
5. Диго Г. Б., Диго Н. Б., Можаровский И. С. [и др.]. Разработка моделей показателей качества ректификационных колонн, функционирующих в предельных режимах // Идентификация систем и задачи управления: сб. тр. конф. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 211 – 221.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. 3-е изд. М.: Вильямс, 2016. 912 с. ISBN 978-5-8459-0963-3.
7. Ибатуллин А. А., Огудов А. А., Хакимов Р. А. Применение непрерывного анализа качества при создании системы усовершенствованного управления технологическим процессом установки сернокислотного алкилирования // Омский научный вестник. 2017. № 1 (151). С.119 – 124.
8. Allgower F., Zheng A. Nonlinear model predictive control. Basel: Birkhauser-Verlag. 2000. 472 p. ISBN 978-3-0348-8407-5.
9. Ibatullin A. A., Ogudov A. A., Khakimov R. A. [et al.]. Application of a continuous oil product quality analysis using neural networks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Astana, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998558.
10. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М.: Химия, 1969, 654 с.

**ХАКИМОВ Рустам Анварович**, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

SPIN-код: 9460-1292

AuthorID (РИНЦ): 918508

ORCID: 0000-0001-5976-3203

Адрес для переписки: machinestandard@mail.ru

#### Для цитирования

Хакимов Р. А. Идентификация математической модели процесса гидроочистки дизельного топлива для создания системы оптимизации группы технологических установок нефтеперерабатывающего завода // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 174 – 178. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-174-178.

Статья поступила в редакцию 16.04.2018 г.

© Р. А. Хакимов