

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО ПРОДУКТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ<sup>5</sup>

И.С. Можаровский<sup>1,2</sup>, С.А. Самотылова<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, Владивосток, samotylova@dvo.ru

<sup>2</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Россия, Владивосток, studvvsu@gmail.com

<sup>3</sup>Дальневосточный федеральный университет, Россия, Владивосток

*Аннотация.* Предложено использование алгоритма условных чередующихся математических ожиданий при построении математических моделей для оценки показателей качества выходного продукта на основе экспериментальных данных. Представлена структура математической модели для оценки изо-пентана в верхнем выходном продукте (дистилляте) ректификационной колонны вторичной перегонки бензинов в виде преобразованных входных переменных. Показаны результаты функционирования математических моделей, построенных с использованием обобщённо-регрессионной нейронной сети и алгоритма условных чередующихся математических ожиданий на примере промышленного массообменного технологического процесса.

*Ключевые слова:* массообменный технологический процесс, ректификационная колонна, непараметрические методы, нейронная сеть, алгоритм ACE.

## MATHEMATICAL MODELS DESIGN FOR ESTIMATING THE QUALITY INDICATORS OF THE OUTPUT PRODUCT UNDER UNCERTAINTY

I.S. Mozharovskii<sup>1,2</sup>, S.A. Samotylova<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Automation and Control Process FEB RAS, Russia, Vladivostok, samotylova@dvo.ru

<sup>2</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, Russia, Vladivostok, studvvsu@gmail.com

<sup>3</sup>Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok

*Abstract.* To use an algorithm of conditional alternating expectations when constructing mathematical models to estimate the quality indicators of the output product based on experimental data is proposed. The structure of a mathematical model for evaluating isopentane in the upper output product (distillate) of a distillation column for the secondary distillation of gasoline is presented in the form of transformed input variables. The results of the functioning of mathematical models design using a generalized regression neural network and an algorithm of conditional alternating expectations are shown on the example of an industrial mass transfer technological process.

*Keywords:* mass transfer technological process, distillation column, nonparametric methods, neural network, ACE algorithm.

В большинстве случаев массообменные технологические процессы (МТП) протекают в ректификационных колоннах и широко распространены в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Нестационарность массообменных технологических процессов приводит к сложности при построении моделей для оценки качества выходного продукта МТП. Широкое распространение получили методы построения регрессионных моделей, основанные на математической статистике и машинном обучении. Такой подход основан на предположении о возможности получения аналитически заданной функциональной зависимости (известной или заданной структуры) с последовательным уточнением значений ее коэффициентов. В реальных условиях большинство массообменных технологических объектов, являются слабо формализуемыми из-за недостаточности имеющихся знаний о них и о среде, в которой они функционируют, поэтому универсальные подходы обычно не вносят ясности в выбор структуры модели. В случае нелинейности

---

<sup>5</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-57-53005 ГФЕН\_а).

технологического процесса наиболее перспективными являются непараметрические методы [1, 2], в частности, алгоритм чередующихся условных математических ожиданий (alternating conditional expectations – ACE) [3, 4]. Главная концепция такого подхода при построении моделей заключается в нахождении взаимосвязей между переменными состояния системы (входными и выходными). Причем для оценки взаимосвязей отсутствует необходимость знать априорную информацию о системе.

Для имеющих  $p$  входных переменных  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, p$  и выхода  $Y$  рассматривается модель, выраженная функциональной зависимостью:

$$Y = F(X, B) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $X = (x_1, \dots, x_p)$  – вектор входных контролируемых технологических переменных;  $B = (b_0, b_1, \dots, b_p)$  – вектор коэффициентов;  $\varepsilon$  – погрешность измерения выходной переменной.

При использовании алгоритма ACE переходим от модели вида (1) к выражению:

$$\Theta(Y) = \sum_{i=1}^p \Phi_i(x_i) + \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\Theta$  – функция выходной переменной  $Y$ ;  $\Phi_i$  – функции входов  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, p$ ;  $\varepsilon$  – ошибка.

Ставится задача построения математических моделей для оценки показателей качества (ММОПК) выходного продукта сложных нелинейных объектов на основе экспериментальных данных при неизвестной структуре.

Рассматривается массообменный технологический процесс вторичной перегонки бензинов С-6 (рис. 1). Для процесса необходима оценка показателя качества по доле изо-пентана в выходном верхнем продукте (дистилляте).

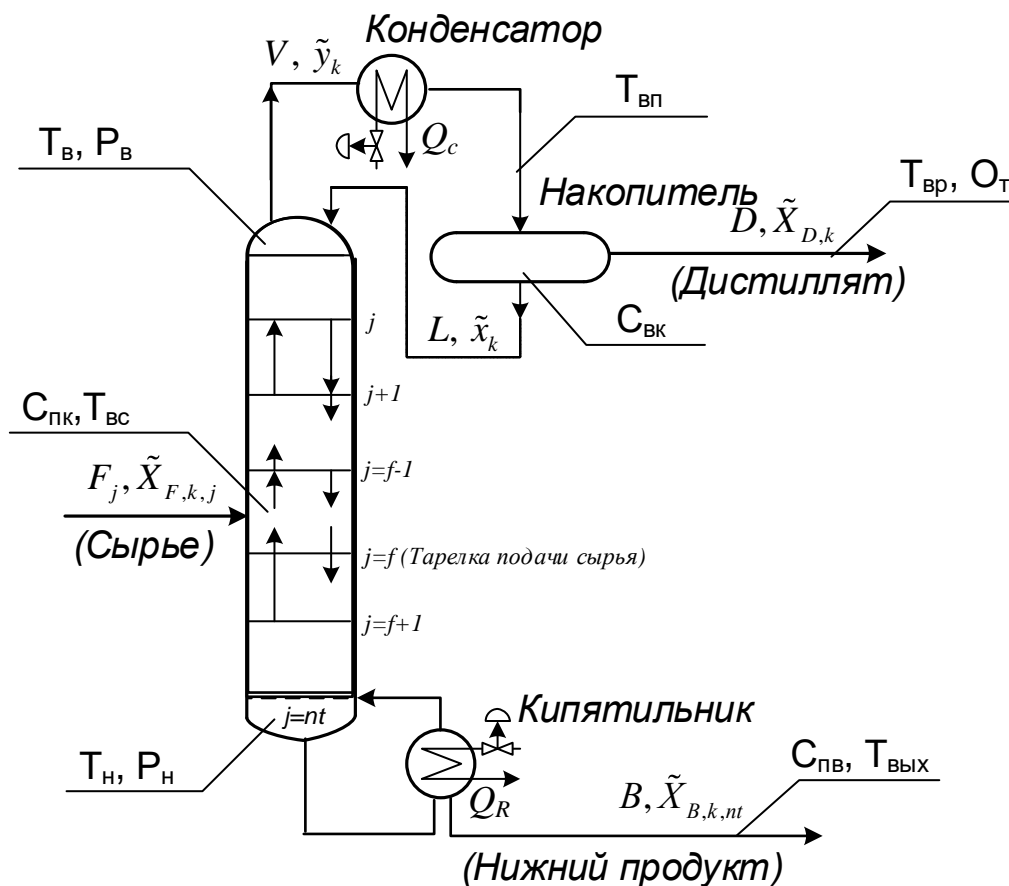


Рис. 1. Схематическое изображение ректификационной колонны вторичной перегонки бензинов С-6

При построении математической модели оценки показателя качества выходного продукта РК по доле изо-пентана  $Y$  (моль/кг) использовались данные с реального объекта:  $x_1$  – количество производимого продукта (дистиллята), т/ч;  $x_2$  – расход орошения, м<sup>3</sup>/ч;  $x_3$  – давление верха колонны, кг/см<sup>2</sup>;  $x_4$  – температура верха колонны, °С,  $x_5$  – температура низа колонны, °С. Из представленных входов сформированы выборки данных для построения математических моделей для оценки содержания изо-пентана в выходном продукте (дистилляте).

При построении моделей для оценки показателя качества выходного продукта использовали обобщённо-регрессионную нейронную сеть (generalized regression neural network – GRNN) и алгоритм ACE. Основной задачей при построении ММОПК с использованием нейронных сетей нелинейных объектов является определение структуры нейронной сети и ее обучение [5]. Использование алгоритма ACE позволяет получить структуру математической модели из преобразованных параметров модели (рис. 2).

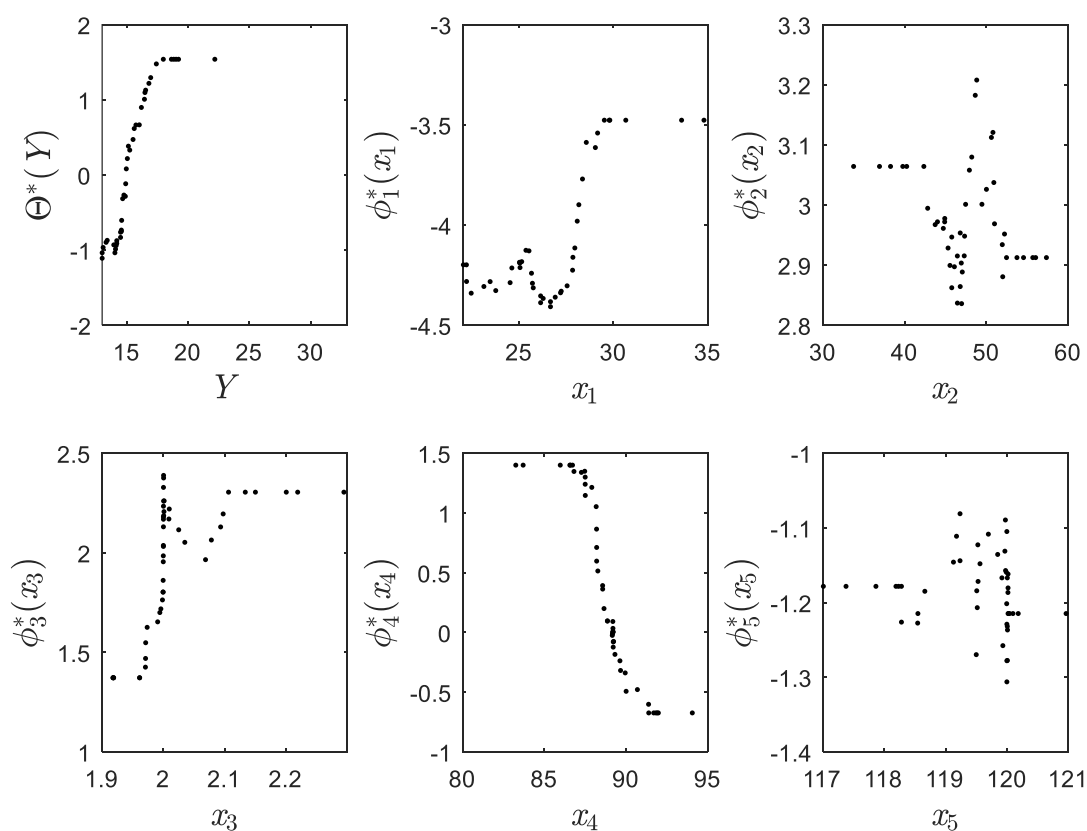


Рис. 2. Результат применения алгоритма ACE для определения структуры математической модели для оценки изо-пентана в дистилляте РК С-6

Из визуального представления преобразованных входных переменных (рис. 2) следует, что  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  нелинейно влияют на выход.

Для оценки эффективности используемых подходов полученные модели проверены на тестовой выборке исторических данных технологического процесса размером  $N$ . На рис. 3 приведены результаты экспериментальных данных технологического процесса ( $Y$ ), а также результаты функционирования моделей, полученных с использованием обобщённо-регрессионной нейронной сети ( $\hat{Y}_{НС}$ ) и алгоритма ACE ( $\hat{Y}_{ACE}$ ).

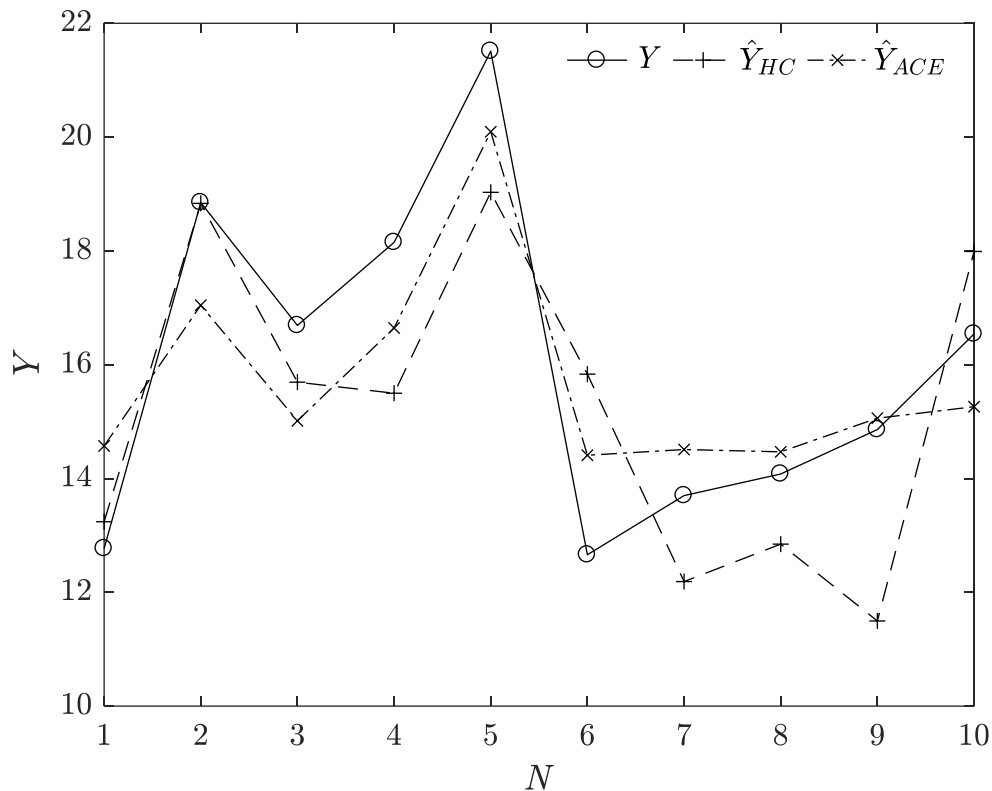


Рис. 3. Результаты функционирования математической модели для оценки изо-пентана в дистилляте РК С-6

По результатам функционирования математических моделей для оценки показателя качества выходного продукта показано явное преимущество использования алгоритма ACE. Применение алгоритма ACE позволяет повысить точность модели на  $(100 \times (0,6312 - 0,3523) / 0,6312) \approx 44,2\%$  в сравнении с моделью, полученной с использованием метода нейронных сетей. Построение математических моделей для оценки показателя качества выходного продукта на основе нейронных сетей целесообразно применять в случае объектов, имеющих выраженные связи выходной переменной с входными. В случае, когда такие связи неявные (слабые), требуются дополнительные исследования, направленные на определение структуры и параметров прогнозирующего алгоритма нейронных сетей, от которых зависит успешность разрешения поставленной задачи.

#### Библиографический список

1. Hengl S., Kreutz C., Timmer J., Maiwald T. Data-based identifiability analysis of non-linear dynamical models // *Bioinformatics*. 2007. V. 23. No. 19. P. 2612–2618.
2. Di Ciaccio A., Montanari G.E. Non-parametric methods for data-mining applications // *Atti della XLI Riunione scientifica della Societa italiana di Statistica. Sessioni plenarie e Sessioni specializzate*. CLEUP. Padova. 2002. P. 339-348.
3. Breiman L., Friedman J. Estimating optional transformations for multiple regression and correlation // *Journal of the American Statistical Association*. 1985. V. 80. P. 580-598.
4. Wang D., Murphy M. Estimating optimal transformations for multiple regression using the ACE algorithm // *Journal of Data Science*. 2004. V. 2. P. 329-346.
5. Angelov P., Filev D. An approach to on-line identification of evolving Takagi-Sugeno models // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 2004. V. 34. No 1. P. 484–498.