УДК 62-52:681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАКЦИОНИРУЮЩЕЙ КОЛОННЫ ПРОЦЕССА ВИСБРЕКИНГА

MODELING OF FRACTIONATING COLUMN OF THE VISCOSITY BREAKING PROCESS

А. Бахри, И. В. Жуков, В. Г. Харазов
A. Bahri, I. V. Zhukov, V. G. Kharazov

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: висбрекинг; фракционирующая колонна; статическая модель
Key words: viscosity breaking; fractionating column; static model

Повышение требований к улучшению показателей работы установок висбрекинга связаны, с одной стороны, со снижением спроса на мазут, а с другой — с необходимостью увеличения выхода продукта.

Для получения товарного топлива из получающегося при вакуумной перегонке мазута гудрона требуется значительное количество дистиллятных разбавителей. Поэтому наиболее простым способом снижения вязкости тяжелых фракций, к которым относятся гудрон, мазут, вакуумный остаток и др. тяжелые остатки, является процесс висбрекинга [1].

В работе рассматривается процесс висбрекинга с выносной реакционной камерой (реактором или сокинг-камерой), протекающий при температурах 430–450 ^{0}С и времени пребывания от 10 до 30 минут.

Основными технологическими параметрами исследуемой колонны фракционирования являются температуры верхней (промывной) зоны, средней (зоны квенча) и отпарной (низа колонны). К другим параметрам относятся давление верхней части колонны, перепад давлений, расход и температура продукта, поступающего во фракционирующую колонну, расход квенча, температура и расход продукта в 17-ую тарелку и расход флегмы в верхнюю часть колонны.

Показателем эффективности процесса является получение котельного топлива заданного состава. Цель управления — поддержание характеристик целевого продукта на заданном значении, а также оптимизация процесса с целью увеличения выхода продукта (удельного расхода бензина). Критерием управления является минимум СКО основных регулируемых параметров при условии ограничений на управляющие воздействия.

Разработка оптимальной системы управления процессом висбрекинга выдвигает на начальном этапе задачи моделирования основной колонны фракционирования. Разработка прогнозирующей модели процесса висбрекинга в целом необходима для создания усовершенствованной системы управления или АРС-системы (Advanced Process Control).

Как известно, подобные системы широко применяются на ряде отечественных НПЗ для управления процессами первичной переработки нефти на установках ЭЛОУ-АВТ-2 компаниями Honeywell, Siemens, Emerson и др.

На рис. 1 представлен фрагмент технологической схемы, включающей сырьевую емкость $Е_1$, печь $П_1$, реактор $Р_1$, фракционирующую колонну $К_1$, отпарную колонну $К_2$, а также теплообменники Т-1…Т-3 и насосы.

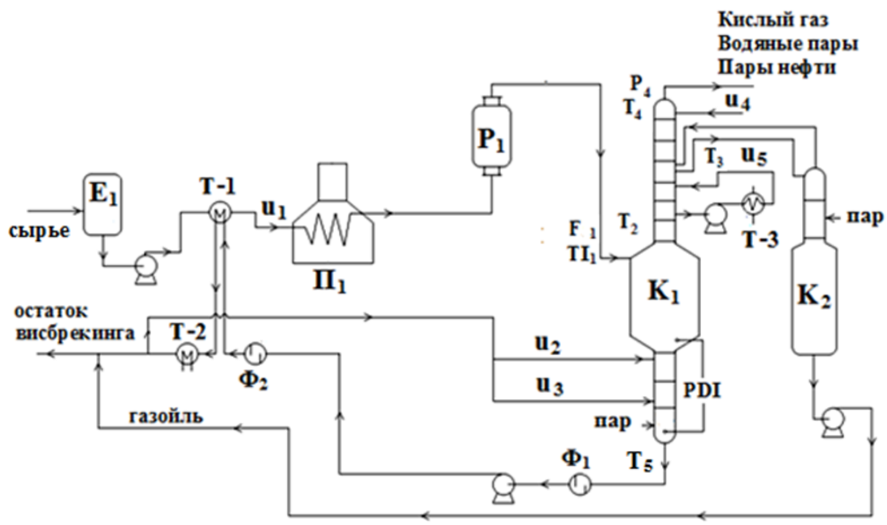


Рис. 1. ***Технологическая схема процесса висбрекинга***

Сырье (u_1) поступает из емкости $Е_1$ в теплообменник Т-1, где нагревается с помощью остатка висбрекинга из установки, а затем поступает в трубную печь ($П_1$), где нагревается до температуры 430–450 ^{0}С. Затем продукт поступает в реактор или сокинг-камеру $Р_1$, где в течение 10–30 минут происходит реакция крекирования нефтепродуктов до требуемой глубины конверсии.

Из сокинг-камеры продукт поступает во фракционирующую колонну, где происходит его разделение на газ, нестабильную нафту, газойль и остаток висбрекинга. Из верхней части колонны фракционирования $К_1$ выводятся кислый газ, водяной пар и пары нафты, которые конденсируются и охлаждаются в аппарате воздушного охлаждения и водяном холодильнике и направляются в емкость $Е_2$ (на схеме не показана), откуда насосом направляются на орошение колонны K_1 (u_4). Из средней части колонны K_1 боковым погоном выводится газойлевая фракция, которая поступает в отпарную колонну K_2. Газойль с куба отпарной колонны K_2 насосом подается на смешение с остатком висбрекинга. Избыточное тепло из колонны K_1 отводится циркуляционным орошением (u_5) в теплообменник, где охлаждается и возвращается в колонну K_1.

Из нижней части колонны K_1 выводится тяжелый газойль, часть которого (u_1) и (u_2) после фильтров поступает в теплообменники Т-1 и Т-2 и возвращается в колонну K_1 в виде квенча, а другая часть смешивается с легким газойлем с куба отпарной колонны K_2 и выводится с установки.

Значение выходной переменной модели $\hat{y}$ в момент времени t в зависимости от входных переменных имеет вид

$$\hat{y}(t) = b_1 f_1(t) + b_2 f_2(t) + \cdots b_k f_k(t), \quad (1)$$

где $f(t)$ — входные переменные); k — количество входных переменных.

Минимум ошибки отклонения выходной переменной y от ее модельного значения $\hat{y}$ имеет вид

$$\min \varepsilon = \sum_{i=0}^{N} (y - \hat{y})^2. \quad (2)$$

Матричная форма значений $\hat{y}(t)$ для $t = 1\ldots n$ имеет вид

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t_1) \\ \vdots \\ \hat{y}(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 f_1(t_1) + b_2 f_2(t_1) + \cdots b_k f_k(t_1) \\ \vdots \\ b_1 f_1(t_n) + b_2 f_2(t_n) + \cdots b_k f_k(t_n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

После упрощения формула (3) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t_1) \\ \vdots \\ \hat{y}(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t_1) & f_2(t_1) & f_k(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(t_n) & f_2(t_n) & f_k(t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Обозначим $\hat{y} = H\,\theta$, где

$$H = \begin{bmatrix} f_1(t_1) & f_2(t_1) & f_k(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(t_n) & f_2(t_n) & f_k(t_n) \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Подставив уравнение (4) в уравнение (1), получим

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{N} (y - H\theta)^2. \quad (6)$$

Оптимальным значение параметров будет при минимальной сумме ошибок ε, то есть $\frac{d\varepsilon}{d\theta} = 0$. После нахождения производной получим значения оптимальных параметров в момент времени t_n для n измерений

$$\hat{\theta}_n = (H_n{}^T H_n)^{-1} (H_n{}^T Y_n). \quad (7)$$

Уравнение (7) применимо для расчетов МНК, однако его неудобство состоит в том, что размер матрицы H_n растет с ростом количества измерений «n».

Используем рекурсивный МНК, получим

для $n+1$ измерений $$\hat{\theta}_{n+1} = \left(H_{n+1}{}^T H_{n+1}\right)^{-1}\left(H_{n+1}{}^T Y_{n+1}\right), \qquad (8)$$
где

$$H_{n+1} = \begin{bmatrix} f_1(t_1) & f_2(t_1) & f_k(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(t_n) & f_2(t_n) & f_k(t_n) \\ f_1(t_{n+1}) & f_2(t_{n+1}) & f_k(t_{n+1}) \end{bmatrix} \quad \mathrm{Y} = \begin{bmatrix} y(t_1) \\ \vdots \\ y(t_n) \\ y(t_{n+1}) \end{bmatrix}.$$

Представим

$$H_{n+1} = \begin{bmatrix} H_n \\ h_{n+1} \end{bmatrix},$$

где $$h_{n+1} = [\, f_1(t_{n+1}) \quad \ldots. \quad f_k(t_{n+1})].$$

Рассчитаем $H_{n+1}{}^T H_{n+1}$, $H_{n+1}{}^T Y_{n+1}$ по формулам

$$H_{n+1}{}^T H_{n+1} = H_n{}^T H_n + h_{n+1}{}^T h_{n+1}, \qquad (9)$$

$$H_{n+1}{}^T Y_{n+1} = H_{n+1}{}^T Y_{n+1} + h_{n+1}{}^T y_{n+1}, \qquad (10)$$

где $y_{n+1} = y(t_{n+1})$.

После подстановки уравнений (9) и (10) в уравнение (8) получим

$$\hat{\theta}_{n+1} = \left(H_n{}^T H_n + h_{n+1}{}^T h_{n+1}\right)^{-1}\left(H_n{}^T Y_n + h_n{}^T y_{n+1}\right). \qquad (11)$$

После обозначений $$P_n = \left(H_n{}^T H_n\right)^{-1} \qquad (12)$$
найдем

$$P_{n+1} = \left(H_n{}^T H_n + h_{n+1}{}^T h_{n+1}\right)^{-1}. \qquad (13)$$

После упрощения формула (13) примет вид

$$P_{n+1} = (I - K_{n+1} h_{n+1}{}^T) P_n, \qquad (14)$$

где $$K_{n+1} = P_n\, h_{n+1}(1 + h_{n+1}{}^T\; P_n\, h_{n+1})^{-1}, \qquad (15)$$

$$\hat{\theta}_{n+1} = \hat{\theta}_n + K_{n+1}(y_{n+1} - h_{n+1}{}^T \hat{\theta}_n). \qquad (16)$$

Уравнения (14), (15) и (16) представляют собой алгоритм РМНК для расчета $\hat{\theta}$ и определения выходных переменных $\hat{y}(t)$.

Начальные значения θ_1, P_1, k_1 равны

$$P_1 = (I - K_1 h_1{}^T) P_0,$$

$$K_1 = P_0\, h_1(1 + h_1{}^T\; P_0\, h_1)^{-1},$$

$$\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_0 + K_1(y_1 - h_1{}^T \hat{\theta}_0).$$

Проблема состоит в том, что $\hat{\theta}_0$ и P_0 неизвестны.

Примем P_0 = G·I, где G — весовой коэффициент; I — единичная диагональная матрица; $\hat{\theta}_0 = 0$. После определения P_0, и $\hat{\theta}_0$, которые представляют предыдущие значения, алгоритм РМНК производит расчет значений P_n и $\hat{\theta}_n$ в каждом шаге (n). Считаем, что в ограниченном диапазоне значений переменных система является линейной.

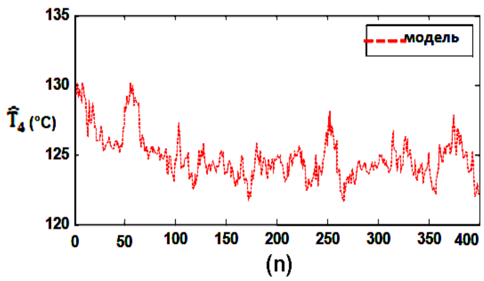
Построим линейную модель для выходных значений переменных T_4, P_4 (температура и давление в верхней части колонны); T_2 (температура средней части колонны); T_5 (температура кубового остатка); PD (перепад давлений); F_1, T_1 (расход и температура продукта, поступающего во фракционирующую колонну); u_2, u_3 (расход квенча); T_3, u_5 (температура и расход продукта в 17-ую тарелку); u_4 (расход флегмы в верхнюю часть колонны).

Определим $\hat{y}(t)$ на основе уравнения (1). Зависимость выходных переменных от входных представляет собой статическую модель, которая имеет вид

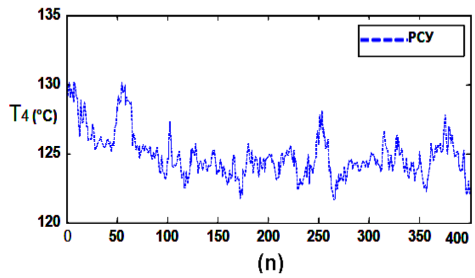
$$y(t) = \theta(t) \cdot f^T(t), \tag{18}$$

где $f^T(t) = [F_1(t);\ T_1(t);\ u_2(t);\ u_3(t);\ u_5(t);\ T_3(t);\ u_4(t)]$; $\theta(t) = [b_1(t)\ .....b_7(t)]$.

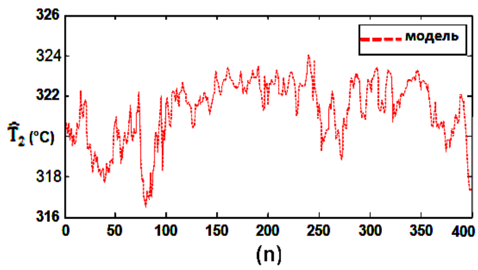
В качестве примера на рис. 2 представлены графики зависимости температуры верхней части колонны T_4 и температуры средней части колонны T_2 от объема выборки (n).



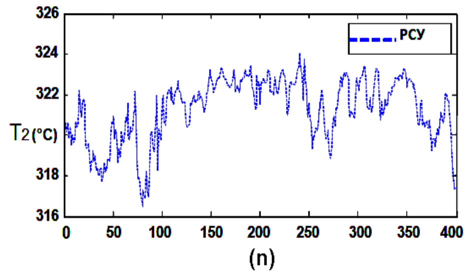
А. *Температура $\hat{T}_4$ верхней части K_1*
(по данным модели)



Б. *Температура,T_4 верхней части K_1*
(по данным РСУ)



В. *Температура $\hat{T}_2$ в средней части K_1*
(по данным модели)



Г. *Температура T_2 в средней части K_1*
(по данным РСУ)

Рис. 2. ***Графики зависимости температуры T4 и T2 от объема выборки (n)***

Графики показывают зависимость выходных переменных от входных переменных в момент t. Из графиков видно, что ошибка определения значений выходных переменных (T_4 , T_2) минимальна.

Представленные ниже уравнения выходных переменных, полученные с помощью РМНК, определяют статическую модель фракционирующей колонны.

Температура верхней части колонны:

$$T_4 = 0{,}3868\ T_1 + 0{,}041\ F_1 - 0{,}034\ u_2 - 0{,}016\ u_3 - 0{,}1862\ T_3 - 0{,}04\ u_4 + 0{,}038\ u_5. \quad (19)$$

Давление в верхней части колонны:

$$P_4 = 0{,}9596\ T_1 + 0.24\ F_1 - 0{,}1719\ u_2 - 0{,}39\ u_3 - 0{,}9273\ T_3 - 0{,}172\ u_4 + 0{,}11387\ u_5. \quad (20)$$

Температура средней части колонны:

$$T_2 = 0{,}88\ T_1 + 2{,}84\ F_1 - 0{,}0829\ u_2 - 2{,}09\ u_3 - 1{,}26T_3 - 2{,}08\ u_4 + 1{,}35\ u_5. \quad (21)$$

Температуры кубового остатка:

$$T_5 = 0{,}56\ T_1 + 1{,}43\ F_1 - 0{,}67\ u_2 + 0{,}15\ u_3 - 0..013\ T_3 - 0{,}55\ u_4 + 0{,}038\ u_5. \quad (22)$$

Перепад давлений:

$$PD = 2{,}35\ T_1 + 0{,}846\ F_1 - 0{,}6358\ u_2 - 1{,}84\ u_3 - 4{,}11\ T_3 - 0{,}63\ u_4 + 0{,}40\ u_5. \quad (23)$$

Выводы

- Определены основные параметры фракционирующей колонны (температура и давление в верхней части колонны T_4, P_4, температура средней части колонны T_2, температура кубового остатка T_5, перепад давления PD) с использованием массива данных.
- С помощью РМНК определены выходные переменные статической модели на основе уравнения $\hat{y} = b_1\, u_1 + b_2\, u_2\ + \cdots + b_k\, u_k$, сопоставимые с данными РСУ, полученными на реальном объекте.
- На основе полученной модели выявлена возможность дальнейшей разработки оптимальной системы управления фракционирующей колонной с целью минимизации СКО и увеличения выхода продукта (удельного расхода бензина).

Список литературы

1. Ермоленко А. Д., Кашин О. Н., Лисицын Н. В., Макаров А. С., Фомин А. С., Харазов В. Г. Автоматизация процессов нефтепереработки: уч. пос. / А. Д. Ермоленко, О. Н. Кашин, Н. В. Лисицын и др.; под общ. ред. д-ра техн. наук В. Г. Харазова. – СПб.: Профессия, 2012 – 304 с.
2. Identification récursive des Systèmes a Dérivée Non enti ère, Abdelbaki Djouambi, Alina Voda, Abdelfattah Charef. Laboratoire d'Automatique de Grenoble LAG-ENSIEG. Journées Identification et Modélisation Expérimentale, 2006. Poitiers, France
3. Application of Recursive least squares method for parameter identification of DEH governing system, Chunlin Menh, Deren Sheng, Jianhong Chen, Haoren Ren. International conference on power engineering, 2007.

Сведения об авторах

Бахри Абдеррахим*, аспирант кафедры автоматизации Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)4949253, e-mail: abderrahim. bahri@gmail.com*

Жуков Игорь Викторович*, к. т. н., инженер-технолог отдела АСУ ТП ООО «Кинеф»; г. Кириши, e-mail: zhukov_i_v@mail.ru*

Харазов Виктор Григорьевич*, д. т. н., профессор кафедры автоматизации Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)4949253, e-mail: vikharazov@yandex.ru*

Information about the authors

Bahri A. *postgraduate of the chair automation, State Institute of Technology Saint Petersburg, phone: 8(812) 4949253, e-mail: abderrahim.bahri@gmail.com*

Zhukov I. V., *Candidate of Science in Engineering, engineer-technologist of APCS Department of LLC «KINEF», Kirishi, e-mail: zhukov_i_v@mail.ru*

Harazov V. G. *Doctor of Engineering, Professor of the chair automation, State Institute of Technology Saint Petersburg, phone: 8(812)4949253, e-mail: vikharazov@yandex.ru*