УДК 66.048

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЛОННЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ НЕФТИ

Самборская М.А., Вольф А.В., Кравцов А.В., Павлик В.В.

ФГБОУ ВПО «НИ Томский политехнический университет», Томск, e-mail: awolf@tpu.ru

Разработан новый подход к расчёту параметрической чувствительности колонны фракционирования нефти. Подход основан на упрощенной математической модели многокомпонентной ректификации, предложенной авторами. Адекватность модели подтверждена результатами строгого моделирования, выполненного с использованием коммерческого симулятора PetroSim™. Выбраны входные, выходные и управляющие параметры колонны, обоснованы интервалы возмущений. Получены уравнения для оперативного расчета в режиме реального времени ненормированных и нормированных коэффициентов чувствительности. Для давления и температуры верха колонны рассчитаны коэффициенты параметрической чувствительности к возмущениям входных и регулирующих параметров. Выявлены области высокой параметрической чувствительности колонны. Показана высокая параметрическая чувствительность для мольных флегмовых чисел выше 3. Показана устойчивость колонны к колебаниям параметров питания. Даны рекомендации по устойчивой работе и оптимальному управлению колонны.

Ключевые слова: ректификационная колонна фракционирования нефти, математическая модель, коэффициент параметрической чувствительности

PARAMETRICAL SENSITIVITY ANALYSIS OF CRUDE OIL DISTILLATION UNIT

Samborskaya M.A., Volf A.V., Kravtsov A.V., Pavlik V.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: awolf@tpu.ru

A new approach to parametrical sensitivity calculation was developed and applied for analysis of crude oil distillation unit. The approach based on reduced order mathematical model of multicomponent distillation developed by authors. Model adequacy confirmed by rigorous simulation with commercial simulator PetroSim™. Input, output, control variables and disturbance ranges have been soundly chosen. Equations for quick on-line calculation of both sensitivity coefficients and reduced sensitivity coefficients were developed. Sensitivity coefficients for temperature and pressure at the top of distillation column against disturbances of input and control variables were calculated. Ranges of high parametrical sensitivity were revealed for crude distillation unit. High parametrical sensitivity was shown under reflux ratio on mole basis exceeding 3. Stability of crude oil distillation unit to feed rate disturbances was shown. Recommendations for stable performances and optimal control were delivered.

Keywords: crude oil distillation unit, mathematical model, parametrical sensitivity coefficient.

Анализ параметрической чувствительности (ПЧ) – необходимый этап проектирования ректификационных установок, разработки контуров управления, оптимальной и безопасной эксплуатации действующих производств.

Процесс фракционирования нефти представляет собой сложный объект проектирования, управления и эксплуатации в силу многокомпонентности разделяемой смеси, большого числа регулируемых параметров, сложности их взаимосвязи, недостаточно изученной динамики процесса. Анализ ПЧ позволяет:

- определить области высокой ПЧ, работа в которых, в общем случае, нежелательна, поскольку может привести к нештатным и аварийным ситуациям;
- дать рекомендации по разработке оптимальных алгоритмов управления;
- выполнить оптимизацию установки.

Особую ценность количественная информация о чувствительности системы имеет на этапе проектирования установки, т.к. позволяет избежать принятия неоптимальных или потенциально опасных проектных решений.

Широко используемые для проектирования установок фракционирования нефти коммерческие симуляторы позволяют выполнить только косвенный анализ ПЧ посредством оценки отклика системы на возмущения параметров [5].

Строгий анализ возможен только с использованием математической модели процесса, однако существующие математические модели ректификации предполагают итерационные расчеты «от тарелки к тарелке», которые пригодны для анализа ПЧ только одной ступени разделения.

Авторами разработана математическая модель процесса, предназначенная для предпроектного анализа, проектирования и разработки оптимальных алгоритмов управления, в явном виде связывающая входные и управляющие переменные с выходными [2].

Цель работы заключалась в исследовании параметрической чувствительности колонны ректификации нефтяного сырья с использованием разработанной математической модели процесса для определения количественного влияния возмущений параметров на показатели эффективности работы колонны.

Объектом исследования была колонна ректификации нефтяного сырья с конденсатором флегмы, предназначенная для отбора легких дистиллятов. Рассматривалась колонна, как с полным, так и с парциальным конденсатором (рис. 1), поскольку при фракционировании нефтяного сырья велика вероятность присутствия легких неконденсируемых компонентов в верхнем продукте колонны.

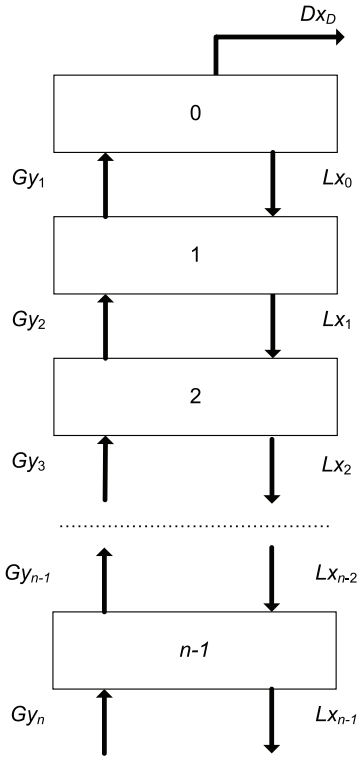

Рис. 1. Схема потоков колонны фракционирования с парциальным конденсатором. Основные обозначения: G, L, D – расходы жидкости, пара на тарелках и дистиллята соответственно, x, y – составы жидкости и пара на соответствующих (0 – n) тарелках

Показателем эффективности работы колонны служит состав дистиллята, однако многокомпонентность смеси исключает измерения состава в реальном времени, поэтому регулирование часто выполняют на основе сравнения заданных и измеренных значений температуры и давления на верху колонны. Таким образом, температура и давление верха колонны выбраны в качестве целевых управляемых параметров. Исследована их чувствительность к возмущениям входных параметров: составу, расходу и температуре питания, а также чувствительность к возмущениям расхода флегмы и тепловой нагрузки на конденсатор, которые являются управляющими параметрами.

Величина возмущения параметра определялась технологическим регламентом и погрешностью КИП.

В технологическом регламенте, как правило, приведен интервал рабочих параметров и процент их допустимого отклонения от интервала.

В процессе пуска установки происходит калибровка АСУ, в результате чего регулятор работает по установленному, обычно, линейному закону в рамках регламентного диапазона значений параметров. Для параметров с высокой параметрической чувствительностью при выходе за пределы интервала может наблюдаться сильное отклонение от закона регулирования, полученного в ходе калибровки. В результате в систему вносится возмущение, компенсация которого средствами АСУ затруднена. Это может привести к опасным, или даже аварийным ситуациям.

Погрешность КИП также может служить источником возмущений. В этом случае диапазон возмущений определяется минимальной точностью КИП. Для параметров с высокой параметрической чувствительностью даже небольшая погрешность КИП может привести к значительному возмущению.

В результате анализа технологического регламента и погрешностей КИП (табл. 1) и структуры контуров управления, для исследования выбран 5%-й интервал отклонения от проектных значений параметра.

Таблица 1

Погрешность КИП [1]

Параметр	Погрешность измерений	Накапливаемая погрешность (устраняется поверкой)	Итого
Расход (массовый), жидкость	до 1%	0,2%	1,2%
Расход (массовый), пар	до 2,5%	0,2%	2,7%
Температура	0,3%	0,1%	0,4%
Давление	0,2%	0,2%	0,4%
Уровень жидкости в ёмкости	0,03–0,65%	–	0,65%

Уравнения математической модели для расчёта состава дистиллята выглядят следующим образом:

Для полного конденсатора:

$$X_{jD} = \frac{X_{jn}}{\frac{1}{(R+1)K_j}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^i\right)+\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^n}, \quad (1)$$

Для парциального конденсатора:

$$X_{jD} = \frac{X_{jn}}{\frac{1}{(R+1)}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^i\right)+\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^n}, \quad (2)$$

где X_{jn} $j = 1$–C – концентрация j-го компонента в жидкости на тарелке питания; C – число компонентов смеси; R – мольное флегмовое число; n – число тарелок в колонне; X_{jDn} – концентрация j-го компонента в дистилляте.

Уравнения (1), (2) могут быть записаны не только через R, но и через комбинацию других технологических параметров (расход дистиллята и расход жидкости, или пара в колонне, тепловая нагрузка на конденсатор). Основные допущения модели и варианты записи уравнения для расчёта составов через различные параметры представлены в работе [2].

Используя ряд общепринятых допущений [4], можно связать давление и температуру верха колонны с составом дистиллята:

- температура кипения жидкости рассчитывается, как среднемольная температура кипения состава на заданной тарелке ($T_{\text{кип.ср.мольн}} = \sum T_{\text{кип.}j} X_j$);
- давление рассчитывается через парциальные давления компонентов $P = \sum P_j^0 X_j$ (P_j^0 – давление насыщенных паров компонента или фракции, рассчитывается, например, по уравнению Ашворта).

На начальном этапе была выполнена проверка разработанной модели на адекватность. Сравнение выполнялось с результатами точного моделирования, полученными в САПР КВС PetroSim, результаты для фракционного состава дистиллята колонн, оснащенных полным и парциальным конденсаторами, приведены на рис. 2 и 3.

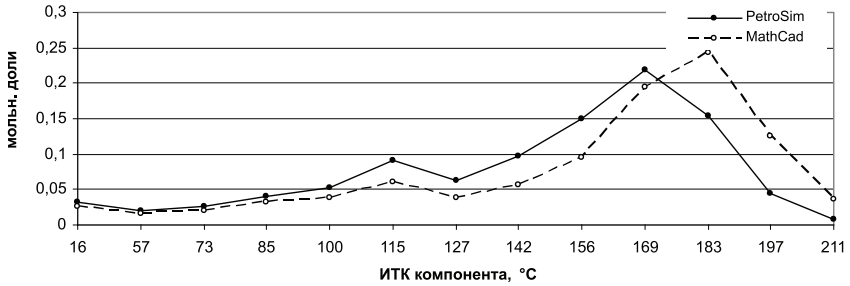

Рис. 2. Фракционный состав дистиллята колонны с парциальным конденсатором. Основные обозначения (рис. 2 и 3): NBP – нормальная температура кипения

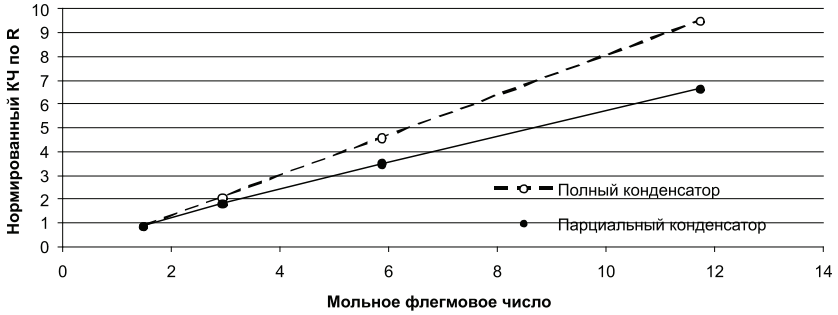

Рис. 3. Фракционный состав дистиллята колонны с полным конденсатором

Хорошая адекватность модели позволила использовать ее для оперативного расчета коэффициентов чувствительности, которые рассчитаны как модуль соответствующей частной производной функций состояния [3]:

$$S_i = \frac{\partial F}{\partial E_i}, \qquad (5)$$

где S_i – коэффициент чувствительности элемента; F – функция состояния элемента; E_i – изменяемый параметр.

В практике расчетов нашли широкое применение нормированные коэффициенты чувствительности:

$$S_{E_i}^{F} = \frac{\partial F}{\partial E_i} \cdot \frac{E_i}{F}. \qquad (6)$$

Их неоспоримым преимуществом является безразмерная форма, что позволяет формировать функции для управления и оптимизации, содержащие разнородные коэффициенты чувствительности.

Формула для расчёта нормированного коэффициента чувствительности температуры в соответствии с (6) имеет вид:

$$S_R^{T_{\text{кип.ср.мольн}}} = \frac{\partial T_{\text{кип.ср.мол}}}{\partial R} \cdot \frac{R}{T_{\text{кип.ср.мол}}} = \left(\sum T_j^{\text{кип}} \frac{\partial X_{Dj}}{\partial R} \right) \cdot \frac{R}{\sum T_j^{\text{кип}} X_{Dj}} = R \cdot \frac{\sum T_j^{\text{кип}} \frac{\partial X_{Dj}}{\partial R}}{\sum T_j^{\text{кип}} X_{Dj}}. \qquad (7)$$

Формула расчёта нормированного коэффициента чувствительности давления по расходу пара имеет вид:

$$S_R^{P} = \frac{\partial P}{\partial R} \cdot \frac{R}{P} = \left(\sum P_j^0 \frac{\partial X_{jD}}{\partial R} \right) \cdot \frac{R}{\sum P_j^0 X_{jD}} = R \cdot \frac{\sum P_j^0 \frac{\partial X_{jD}}{\partial R}}{\sum P_j^0 X_{jD}}, \qquad (8)$$

где

$$\frac{\partial}{\partial R} X_{Dj} = \frac{-X_{nj}\left[-\frac{1}{(R+1)^2}\frac{1}{K_j}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left[\left(\frac{R}{R+1}\right)^i\left(\frac{1}{K_j}\right)^i\right]\right)+\frac{1}{(R+1)K_j}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left[\frac{1}{(R+1)^2}i\left(\frac{R}{R+1}\right)^{i-1}\left(\frac{1}{K_j}\right)^i\right]\right)+\frac{1}{(R+1)^2}n\left(\frac{R}{(R+1)}\right)^{n-1}\left(\frac{1}{K_j}\right)^n\right]}{\left[\frac{1}{(R+1)K_j}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^i\right)+\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^n\right]^2}$$

получена дифференцированием (1) для полного конденсатора и

$$\frac{\partial}{\partial R} X_{Dj} = \frac{-X_{nj}\left[-\frac{1}{(R+1)^2}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left[\left(\frac{R}{R+1}\right)^i\left(\frac{1}{K_j}\right)^i\right]\right)+\frac{1}{(R+1)}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left[\frac{1}{(R+1)^2}i\left(\frac{R}{R+1}\right)^{i-1}\left(\frac{1}{K_j}\right)^i\right]\right)+\frac{1}{(R+1)^2}n\left(\frac{R}{(R+1)}\right)^{n-1}\left(\frac{1}{K_j}\right)^n\right]}{\left[\frac{1}{(R+1)}\left(\sum_{i=0}^{n-1}\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^i\right)+\left(\frac{R}{(R+1)K_j}\right)^n\right]^2}$$

(2) – для парциального.

Исследовалась колонна, оборудованная 5 теоретическими тарелками и конденсатором. Состав питания приведен в табл. 2. Расчеты выполнены для 4 вариантов расхода питания. Возмущения расхода и температуры питания выражены через изменение профилей расходов жидкости и пара по колонне. Нормированные коэффициенты чувствительности, рассчитанные в MathCad™ по формулам (6,7), приведены в табл. 3, 4 и на рис. 4, 5.

Результаты расчетов показали слабую параметрическую чувствительность колонны фракционирования нефти к возмущениям расхода, состава и температуры питания. Колонна устойчиво работает при 5%-х отклонениях перечисленных параметров от регламентных значений, причем это утверждение справедливо для различных нагрузок.

Параметрическая чувствительность по мольному флегмовому числу растет с ростом значения флегмового числа, поэтому использование данного параметра для точного регулирования нецелесообразно при $R > 3$.

Таблица 2

Состав питания

Компонент	Мольная доля	Компонент	Мольная доля	Компонент	Мольная доля
NBP 16	0,186	NBP 197	0,028	NBP 336	0,013
NBP 57	0,049	NBP 211	0,025	NBP 350	0,012
NBP 73	0,043	NBP 225	0,026	NBP 364	0,011
NBP 85	0,052	NBP 238	0,026	NBP 378	0,014
NBP 100	0,046	NBP 253	0,020	NBP 391	0,013
NBP 115	0,055	NBP 267	0,026	NBP 405	0,012
NBP 127	0,028	NBP 280	0,023	NBP 419	0,012
NBP 142	0,030	NBP 294	0,016	NBP 441	0,026
NBP 156	0,033	NBP 308	0,018	NBP 469	0,032
NBP 169	0,039	NBP 322	0,020	NBP 494	0,033
NBP 183	0,033				

Таблица 3

Нормированные коэффициенты чувствительности (КЧ) температуры верха колонны к изменению профилей расхода пара и жидкости на тарелках

Расход питания, кг/ч	КЧ к изменению расхода пара		КЧ к изменению расхода жидкости	
	полный конденсатор	парциальный конденсатор	полный конденсатор	парциальный конденсатор
500	0,84	0,83	1,00	0,00
4000	0,84	0,83	0,14	0,17
8000	0,84	0,83	0,44	0,11
12000	0,84	0,83	0,12	0,09

Таблица 4

Нормированные коэффициенты чувствительности (КЧ) давления верха колонны к изменению профилей расхода пара и жидкости на тарелках

Расход питания, кг/ч	КЧ к изменению расхода пара		КЧ к изменению расхода жидкости	
	полный конденсатор	парциальный конденсатор	полный конденсатор	парциальный конденсатор
500	0,90	0,91	0,78	0,83
4000	0,42	0,91	0,11	0,11
8000	0,96	0,91	0,06	0,06
12000	0,96	0,91	0,04	0,04

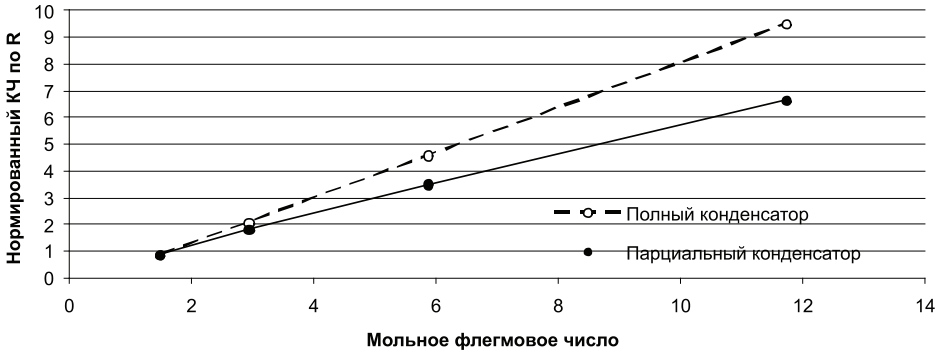

Рис. 4. Нормированный КЧ температуры верха колонны по флегмовому числу

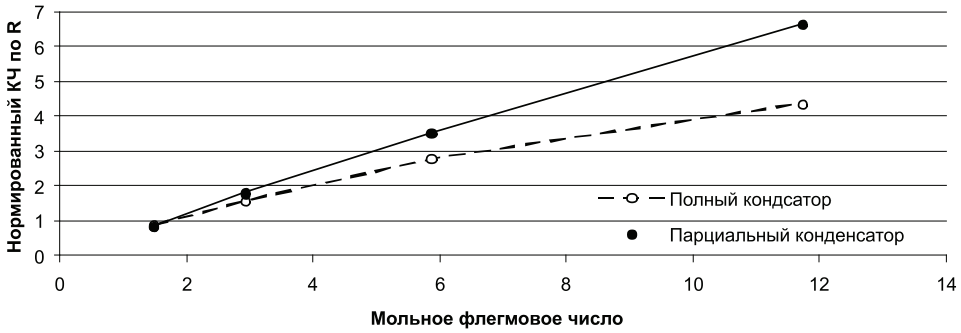

Рис. 5. Нормированный КЧ давления верха колонны по флегмовому числу

Список литературы

1. Измерительные приборы и датчики // METRAN. RU: сайт. Emerson Process Management, 2011. – URL: www.metran.ru (дата обращения: 10.03.2012).

2. Самборская М.А., Кравцов А.В., Вольф А.В. Полистационарность процессов фракционирования нефти и нефтепродуктов // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320, № 3 – С. 34–40.

3. Чувствительность функции цепи к вариациям внутренних параметров РЭС // Кафедра РЭИС Уральского федерального университета им. Первого президента России Б.Н. Ельцина: сайт. Екатеринбург, 2012. – URL: http://reis.ustu.ru/docs/helpinfo/kaes/teor/metchuvs/teor_6_1/index.htm (дата обращения: 10.03.2012).

4. Perry's chemical engineers. Distillation. 8th edition.-NY: The McGraw-Hill Company, 2008 – 116 p.

5. Описание программного продукта PetroSim // KBC Advanced Technologies: сайт. KBC Advanced Technologies plc, 2012. – URL: http://www.kbcat.com/Software-Solutions/Process-Simulation/ (дата обращения: 10.03.2012).

References

1. Instrumentation and sensors. METRAN.RU, site. Emerson Process Management, 2011. URL: www.metran.ru (accessed: 10 March 2012).

2. Samborskaya M.A., Kravtsov A.V., Volf A.V. Steady state multiplicity of crude oil and oil products distillation processes. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2012, V. 320, no.3, pp. 34–40.

3. Radio-electronic' systems sensitivity of network function to variation of internal parameters. RIT department of Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin: site. Ekaterinburg, 2012. URL: http://reis.ustu.ru/docs/helpinfo/kaes/teor/metchuvs/teor_6_1/index.htm (accessed: 10 March 2012).

4. Perry's chemical engineers. Distillation. 8th edition. NY: The McGraw-Hill Company, 2008. 116 p.

5. PetroSim software review. KBC Advanced Technologies: site. KBC Advanced Technologies plc, 2012. URL: http://www.kbcat.com/Software-Solutions/Process-Simulation/ (accessed: 10 March 2012).

Рецензенты:

Сваровский А.Я., д.т.н., профессор Северского технологического института филиала НИЯУ МИФИ, г. Северск;

Восмериков А.В., д.х.н., профессор, зам. директора по науке ИХН СО РАН, г. Томск-21.

Работа поступила в редакцию 30.03.2012.