

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА ПРОГНОЗО-КОМПЕНСАЦИОННОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

Липин И.А., Луконин В.П.

Дзержинский политехнический институт филиал Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексева, Дзержинск, Россия (606026, г. Дзержинск, ул. Гайдара, 49), e-mail: i.lipin@ast-i.ru

Проведен анализ технологического процесса жидкостной экстракции как объекта управления. Процесс протекает в непрерывном режиме и характеризуется нестационарностью. Установлено, что наиболее важным технологическим модулем процесса является экстракционная колонна как с точки зрения обеспечения регламентированного качества конечной продукции, так и с точки зрения ресурсозатрат на регенерацию экстрагента. При этом, с учетом инерционности объекта с большим запаздыванием по каналам управления и возмущения, модуль экстракционной колонны сложен в управлении. Решить поставленную задачу предложено путем создания прогнозо-компенсационной адаптивной системы управления технологическим процессом с использованием аппарата математического моделирования. Исходя из заданного режима работы при помощи математической модели, численных методов оптимизации и решения дифференциальных уравнений однозначно определяется требуемое управляющее воздействие и передается в автономный контур регулирования расхода экстрагента на вводе в колонну. По сформированным алгоритмам разработана надстройка к программному комплексу системы управления технологическим процессом.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, адаптация, экстракция, управление, процесс.

MATHEMATICAL MODELING AS A THE BASIS OF FORECAST-COMPENSATION ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF LIQUID EXTRACTION PROCESS

Lipin I.A., Lukonin V.P.

Dzerzhinsky Polytechnic Institute branch of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, Dzerzhinsk, Russia (606026, Dzerzhinsk, Gaidar st., 49), e-mail i.lipin@ast-i.ru

The process liquid extraction was analyzed as a control object. The process takes place in a continuous mode and is characterized by non-stationary. Found that the most important technological process is a module extraction column, both from the point of view of the regulated end-product quality, both from the standpoint of resource consumption for regeneration of the extractant. At the same time, taking into account the inertia of the object with large delay on the control channel and the disturbance of the extraction column module is difficult to control. Proposed to solve the problem by creating a forecast-compensatory adaptive process control system using mathematical modeling. According to the specified operation using mathematical models, numerical optimization methods and solutions of differential equations the system uniquely determines the desired control action and transfers it to the autonomous control loop flow extractant for input into the column. Generated algorithms are designed and added to software complex process control system.

Keywords: modeling, forecasting, adaptation, extraction, control.

Технологический процесс жидкостной экстракции характеризуется нестационарностью и, как следствие, сложен в управлении. Одним из методов адаптации является использование математической модели при построении систем управления с целью снижения экономических затрат и исключения неприемлемых характеристик качества продукции.

В настоящее время математическое моделирование является мощным инструментом для построения адаптивных систем управления химико-технологических процессов [2]. Целью настоящей работы является реализация программно-информационной надстройки к автоматизированной системе управления технологическим процессом для обеспечения

возможности прогнозирования выходных параметров (результатов проведения) процесса нормализации экстрактов «Норман-3». Возможность прогнозирования позволила реализовать систему управления, которая принесет существенный положительный экономический эффект, при соблюдении регламентированных качественных показателей конечного продукта.

На рисунке 1 представлена схема проведения экстракционного процесса [3] нормализации экстрактов. Раствор извлеченных веществ в экстрагенте называют экстрактом, а раствор, из которого удалены экстрагируемые компоненты, – рафинатом. Исходный раствор (фаза $\Phi_x + M$) и экстрагент (фаза Φ_y) подают в экстракционный аппарат – экстрактор, в котором происходит перенос вещества M из фазы Φ_x в фазу Φ_y . В результате получают экстракт (фаза $\Phi_y + M$) и рафинат (фаза Φ_x). Далее проводят регенерацию экстрагента из экстракта и экстрагента из рафината. Очищенный экстрагент вновь подается на экстракцию.

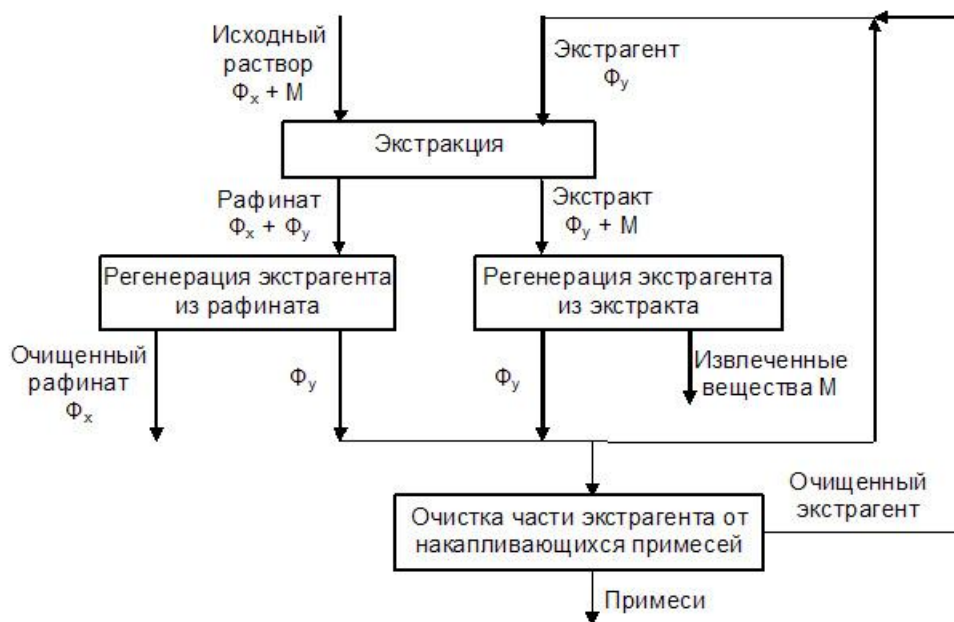


Рис. 1. Принципиальная схема получения нормализованных экстрактов «Норман-3»:

Φ_x – фаза исходного раствора смеси экстрактов; Φ_y – фаза экстрагента-растворителя диметилсульфоксида (ДМСО); M – извлекаемые примеси (ФНЭТ).

Из вышеописанного технологического процесса можно сделать вывод, что наиболее важным узлом с точки зрения обеспечения регламентированного качества производимой продукции («Норман-3») является экстракционная колонна. Адаптивное управление колонной наиболее весомо скажется на качественно-экономических аспектах процесса.

Определим три группы контролируемых параметров [1], определяющие режим работы экстракционной колонны:

- расходы растворителя и очищаемого потока смеси экстрактов на вводе в колонну;
- температура растворителя и очищаемого потока смеси экстрактов на вводе в колонну;

- содержание (массовая доля) тяжелой фракции нефтяных экстрактов (ФНЭТ) в очищаемом потоке смеси экстрактов на вводе в колонну.

Значения таких параметров, как температура растворителя и очищаемого потока смеси экстрактов на вводе в колонну стабилизированы в соответствии с регламентом с использованием самостоятельных контуров регулирования. Таким образом, можно условиться, что температурные показатели проведения технологического процесса практически неизменны по времени.

В качестве основного возмущающего воздействия выступает содержание ФНЭТ в очищаемом потоке смеси экстрактов на вводе в колонну. Технологический параметр не регулируется и не может быть исключен, но оказывает прямое влияние на содержание ФНЭТ в нормализованных экстрактах «Норман-3». При завышенном содержании ФНЭТ в сырье без наличия должных контрдействий показатели конечного продукта становятся регламентационно неприемлемыми и партия забраковывается. В условиях многотоннажного производства размеры такой партии могут превышать 50 тонн, что, естественно, негативно сказывается на экономике предприятия.

С учетом малой инерциальности контура регулирования подачи расхода ДМСО, а также высокой чувствительности режима работы экстрактора при изменении подачи экстрагента видится целесообразным использование его как основное управляющее воздействие. Следует заметить, что чрезмерный расход ДМСО приводит к повышению энергозатрат, необходимых для его регенерации, и также негативно влияет на регламентационный состав конечной продукции. Все вышеописанное формирует потребность в однозначном прогнозировании состава нормализованных экстрактов (рафината) на выходе из колонны.

Установлено, что экстракционная колонна, как объект управления, по каналу возмущения обладает большим транспортным запаздыванием, что делает невозможным использование обратной связи – напрашивается решение сложившейся проблемы путем синтеза прогнозо-компенсационной адаптивной системы управления технологическим процессом нормализации экстрактов.

Для возможности прогнозирования основного показателя качества нормализованных экстрактов (содержание ФНЭТ в очищаемом потоке на выходе из колонны) требуется составление математической модели экстрактора, которая является важнейшим элементом реализации прогнозо-компенсационной адаптивной системы управления.

Основным кинетическим уравнением массообменных процессов является уравнение массопередачи [3]:

$$dM = K \cdot dF \cdot \Delta, \quad (1)$$

где dM – количество массы, переданное из одной фазы в другую, кг;

K – коэффициент массопередачи, показывающий, какое количество распределяемого вещества переходит из фазы в фазу в единицу времени через единицу поверхности контакта фаз при движущей силе, равной единице, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \Delta \cdot \text{м}^2)$;

dF – поверхность контакта фаз, м^2 ;

Δ – движущая сила массообменного процесса.

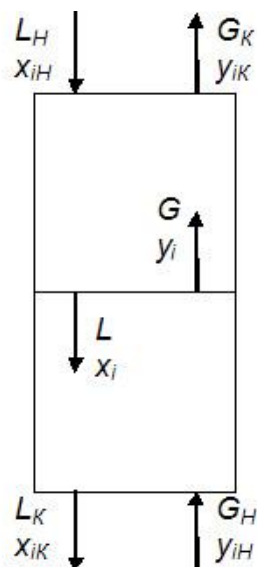


Рис. 2. К составлению материального баланса при непрерывном контакте фаз в условиях противотока: L – расход очищаемого потока (кг/ч); G – расход растворителя (кг/ч); x – концентрация экстрагируемого компонента (примесей) в очищаемом потоке; y – концентрация экстрагируемого компонента (примесей) в растворителе.

Помимо основного уравнения массопередачи, для составления математической модели потребуется уравнение материального баланса при непрерывном противотоке.

При непрерывном противотоке, наиболее часто используемом в технике (рис. 2), материальный баланс для произвольного сечения аппарата при бесконечно малом пути выражается следующими соотношениями [3]: по всему потоку – $dG = dL$, по i -му компоненту:

$$-d(Gy_i) = d(Lx_i), \quad (2)$$

где L – расход очищаемого потока, кг/ч; G – расход растворителя, кг/ч; x – концентрация экстрагируемого компонента (примесей) в очищаемом потоке; y – концентрация экстрагируемого компонента (примесей) в растворителе.

Интегрирование в пределах от начальных значений входящих в это соотношение величин до их значений в произвольном сечении дает:

$$G_H - L_K = G_K - L_H = G - L, \quad (3)$$

$$G_H \cdot y_{iH} - L_K \cdot x_{iK} = G_K \cdot y_{iK} - L_H \cdot x_{iH} = G \cdot y_i - L \cdot x_i. \quad (4)$$

При малом изменении величин G и L по высоте аппарата:

$$y_{iH} = y_{iK} + \frac{L}{G}(x_{iK} - x_{iH}). \quad (5)$$

Уравнение массопередачи (1) для исходного раствора смеси экстрактов и потока экстрагента (растворителя):

$$\Delta \cdot K \cdot dF = G \cdot dy, \quad (6)$$

$$\Delta \cdot K \cdot dF = L \cdot dx, \quad (7)$$

Процесс массопереноса протекает самопроизвольно при наличии разности между рабочими и равновесными концентрациями (при данных условиях температуры и давления) – движущей силе массообменных процессов.

$$\Delta = \begin{cases} (y^* - y), \text{ при } y > y^* \\ (y - y^*), \text{ при } y^* > y \end{cases} \quad (8)$$

Поверхность контакта фаз зависит от высоты экстрактора [4]:

$$dF = F \cdot \frac{dh}{H}. \quad (9)$$

Учитывая выражения для движущей силы массообменного процесса (8) и поверхности контакта фаз (9), дифференциальные уравнения процесса массопередачи для каждого из потоков (6, 7) можно записать следующим образом:

$$(y^* - y) \cdot K \cdot F \cdot \frac{dh}{H} = G \cdot dy, \quad (10)$$

$$(y^* - y) \cdot K \cdot F \cdot \frac{dh}{H} = L \cdot dx. \quad (11)$$

Введя объемный коэффициент массопередачи и дополнив дифференциальные уравнения массопередачи уравнением рабочей линии в общем виде, начальными и граничными условиями, получим математическую модель экстракционной колонны:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dh} = (y^* - y) \cdot \frac{K_{OB}}{H \cdot G} \\ \frac{dx}{dh} = (y^* - y) \cdot \frac{K_{OB}}{H \cdot L} \\ K_{OB} = K \cdot F \\ y^* = f(x) \\ y_{\text{верх}} = 0 \\ x_{\text{низ}} = x_{\text{зад}} \end{cases}. \quad (12)$$

Оценка с использованием критерия Фишера показала адекватность математической модели.

Численной решение математической модели для определения концентрации ФНЭТ в потоках по всей высоте экстрактора представлено на рисунке 3.

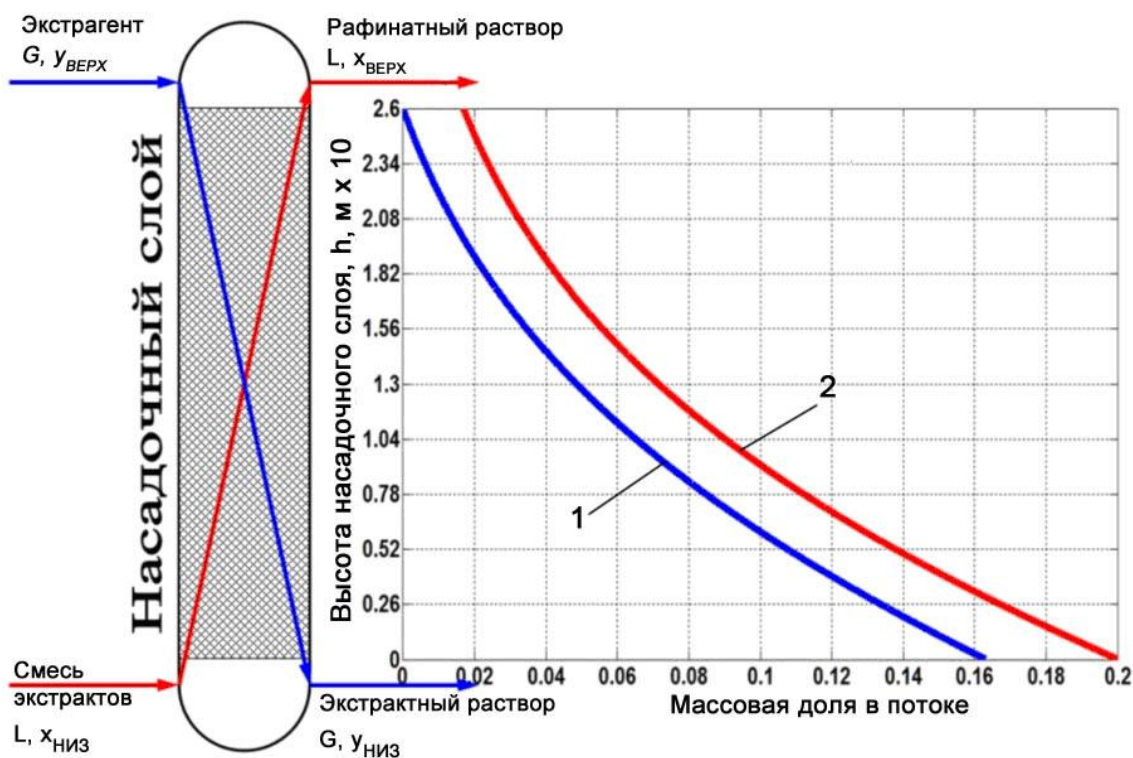


Рис. 3. Определение концентрации ФНЭТ в потоках по всей высоте колонны с помощью математической модели при массовой доле ФНЭТ в смеси экстрактов (исходном сырье) – 0,2.

Благодаря использованию математической модели сформировалась возможность прогнозирования концентрации ФНЭТ в рафинатном растворе на выходе из колонны, что является важнейшей частью формирования управляющего воздействия для обеспечения заданного режима работы экстрактора. Данные о массовой доле примесей в смеси экстрактов (очищаемом потоке) с промышленного рефрактометра поступают в микропроцессорный контроллер. При текущем содержании ФНЭТ в смеси экстрактов, для множества значений расхода растворителя (основное управляющее воздействие) из рабочего диапазона с помощью моделирующего алгоритма рассчитывается множество соответствующих значений содержания примесей в очищаемом потоке на выходе из колонны. Исходя из заданного режима работы при помощи математической модели, численных методов оптимизации [5] и решения дифференциальных уравнений однозначно определяется требуемое управляющее воздействие и передаётся в автономный контур регулирования расхода растворителя на вводе в колонну. По данной последовательности разработано программное обеспечение на базе программно-технического комплекса управления технологическим процессом Siemens Simatic. Программная составляющая системы управления включает два уровня (рис. 4): нижний уровень (программа микропроцессорного контроллера) и верхний уровень (исполняемый модуль среды визуализации).

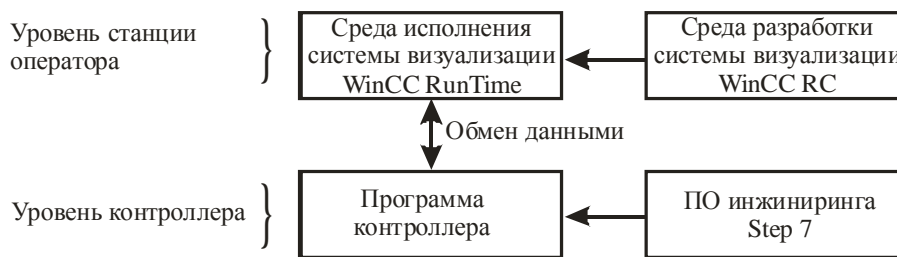


Рис. 4. Структура программного обеспечения.

Каждый уровень программного обеспечения включает среду разработки и исполняемую часть. Исполняемые части уровней контроллера и станции оператора обмениваются между собой данными.

Программное обеспечение резервированного контроллера Siemens Simatic S7-414H разрабатывается в среде программирования Step 7. Step 7 позволяет пройти последовательно все стадии, начиная от проектирования аппаратной конфигурации контроллера и написания пользовательского программного обеспечения и заканчивая программным тестом и архивацией проекта. Программа контроллера написана на языке программирования низкого *S7-LAD*. Представляющий собой аналог релейно-контактных схем, он служит для описания технологических задач различной сложности при высоком быстродействии.

Исполняемая часть программного обеспечения нижнего уровня имеет функционально-блочную структуру. Функциональный блок ввода аналоговых сигналов осуществляет сбор и первичную обработку информации от промышленного рефрактометра посредством аналогово-цифрового преобразователя модуля ввода.

Данные о содержании передаются по настроенному коммуникационному соединению в исполняемую среду верхнего уровня – SCADA-систему WinCC, которая является 32-битным приложением и работает в операционной системе Windows 7 на промышленных станциях оператора.

Ядро среды разработки WinCC образует нейтральная по отношению к отраслям промышленности и технологиям базовая система, которая оснащена всеми важнейшими функциями визуализации и обслуживания.

На интегрированном в среду исполнения WinCC языке Visual Basic for Application разработан макрос, выполняющий расчеты требуемого значения управляющего воздействия по запросу оператора-технолога. Далее это значение расхода экстрагента передается по коммуникационному каналу в исполняемую часть программного обеспечения контроллера в качестве задания типовому функциональному блоку регулятору. Разработанная надстройка среды визуализации в составе программного обеспечения оператора-технолога представлена на рисунке 5.

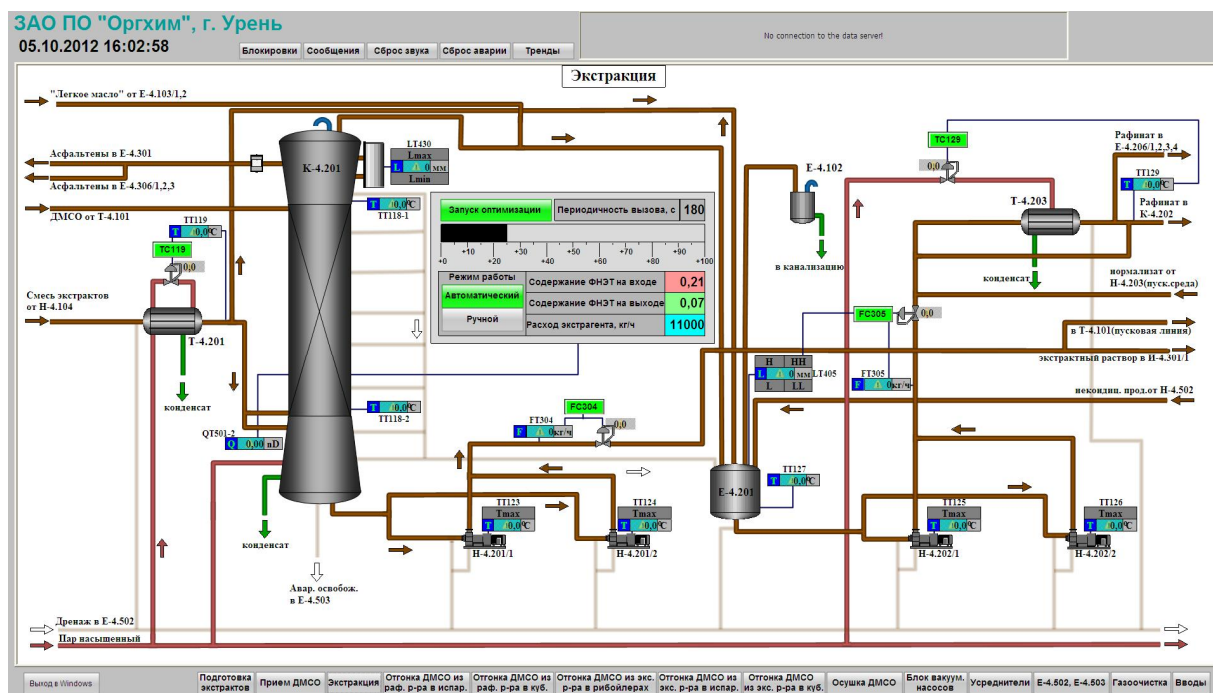


Рис. 5. Окно видеокadra расчета управляющего воздействия с использованием математической модели.

Созданный программно-технический комплекс позволил повысить эффективность производства нормализованных экстрактов «Норман-3» путем уменьшения экономических затрат при однозначном соблюдении регламентационных показателей качества.

Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
2. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М. : Химия, 1969. – 564 с.
3. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. – М. : Химия, 1995. – Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. – 368 с.
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. – М. : Химия. – 784 с.
5. Пупкова К.А., Егупова Н.Д. Теория оптимизации систем автоматического управления : учебник для вузов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

Рецензенты

Сидягин Андрей Ананьевич, доктор технических наук, профессор, Дзержинский политехнический институт филиал Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексева, г. Дзержинск.

Сажин Сергей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, академик РАЕ, генеральный директор ООО «НТЦ «АСТ», г. Дзержинск.