

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5

DOI: 10.14529/ctcr200411

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ФЛЕГМОВОГО ЧИСЛА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Л.Г. Тугашова¹, А.В. Затонский²

¹ Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия,

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край, Россия

Введение. В статье приведен обзор способов управления установками первичной переработки нефти. Для улучшения эффективности разделения предложено стабилизировать флегмовые числа в ректификационной колонне. **Цель работы.** Разработать систему автоматического регулирования флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны нефтеперерабатывающей установки. Исследовать режимы работы атмосферной колонны с участием полученной системы автоматического регулирования. **Материалы и методы.** Рассмотрены особенности процесса ректификации нефти атмосферного блока нефтеперерабатывающей установки малой мощности. Отмечены особенности отвода тепла с промежуточным циркуляционным орошением по сравнению с крупнотоннажной установкой. Выполнен выбор параметров объекта с разделением на группы. Для достижения поставленной в работе цели составлена динамическая модель секции кожухотрубных теплообменных аппаратов для нагрева нефти дизельным топливом на нефтеперерабатывающей установке малой мощности в виде системы дифференциальных уравнений теплового баланса. Для нахождения расхода обессоленной нефти и расхода соленой воды составлено уравнение материального баланса электродегидрататора. Получена зависимость флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны от температур на входе и выходе циркуляционного орошения атмосферной колонны, расходов острого орошения, циркуляционного орошения и отбора нефтяных фракций. Результирующая модель состоит из двух частей: линейной части секции электродегидрататора и теплообменников, определяющей температуры теплоносителей, и нелинейной выходной части, определяющей флегмовое число в зависимости от технологических параметров. Предлагаемая модель позволяет исследовать влияние возмущающих воздействий на управляемые параметры. Инструментом реализации полученной модели выбран программный продукт *MATLAB/Simulink*. С участием разработанной модели объекта исследования построена система автоматического регулирования флегмового числа в *MATLAB/Simulink*. **Заключение.** Получены результаты моделирования системы автоматического регулирования флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны нефтеперерабатывающей установки малой мощности с учетом особенностей процесса в условиях воздействия возмущений.

Ключевые слова: ректификация, управление по модели, теплообменный аппарат, циркуляционное орошение, флегмовое число, динамическая модель, параметр.

Введение

В настоящее время на нефтеперерабатывающих установках, являющихся сложными многомерными объектами, актуальной задачей является управление в условиях воздействия различных возмущений при выполнении требований к качеству получаемых нефтепродуктов. При управлении объектами нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) (ректификационными колоннами, теплообменными аппаратами, печами и др.) наряду с типовым решением, предполагающим одноконтурные и каскадные системы автоматического управления (САУ), применяется управление с использованием математических моделей.

Например, в статье [1] приведено описание применения в управлении ректификационной колонной эталонной модели. В работе [2] рассмотрена система усовершенствованного управления компании *Yokogawa*, предназначенная для управления крупным НПЗ на основе прогнозирующих моделей. В работе [3] предложен метод управления по модели малым НПЗ в условиях переменного расхода и состава сырья. Для достижения цели управления предлагается принцип управления атмосферной установкой ректификации нефти, сочетающий сведение задачи управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом установки и стабилизацию промежуточных параметров.

Применяются также регуляторы с внутренней *Internal model control (IMC)*-моделью. Регулятор представляет собой инвертированную модель объекта управления, которую не всегда возможно получить. Например, в работе [4] применяется *IMC*-модель управления температурой нагреваемой жидкости в кожухотрубном теплообменнике. В статье [5] предложено применение каскадной САУ теплоэнергетическими объектами на базе регуляторов с *IMC*-моделью для компенсации возмущений. В методе *Skogestad IMC (SIMC)* [6] задается желаемый вид переходной характеристики замкнутой САУ, описываемый инерционным звеном первого порядка. Параметром настройки *SIMC*-метода является ожидаемая постоянная времени этого звена. Модель объекта аппроксимируется динамическим звеном первого или второго порядка с запаздыванием.

Математическая модель процесса циклической бинарной ректификации с учетом транспортного запаздывания приведена в [7]. В работе [8] получены модели показателей качества нефтепродуктов с учетом транспортного запаздывания с применением *EM*-метода.

В статье [9] предложена адаптивная система регулирования температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника, состоящая из ПИ-регулятора и последовательного псевдолинейного корректирующего устройства динамических свойств систем САУ.

В статье [10] рассмотрена возможность применения компенсаторов возмущений по расходу и составу сырья при управлении ректификационной колонной. При применении компенсаторов затруднительна практическая реализация и возмущений в системе может быть довольно много.

Для улучшения эффективности разделения в атмосферной колонне (АК) маломощной нефтеперерабатывающей установки предлагается поддержание на заданном значении флегмового числа (ФЧ) в секциях колонны. Целью работы является разработка динамической модели теплообменных аппаратов в схеме циркуляционного орошения (ЦО) АК. Для определения ФЧ необходимо дополнить модель теплообменников выражением, определяющим ФЧ в зависимости от температур на входе и выходе (возврате) ЦО дизельного топлива, расхода ЦО, отборов дизельного топлива и бензиновой фракции и других параметров процесса. Затем необходимо провести исследование модели системы автоматического регулирования ФЧ в условиях воздействия возмущений.

Определена следующая последовательность решения задачи: выявление особенностей процесса ректификации нефти на исследуемой установке; выбор входных и выходных параметров объекта управления (ОУ) и определение взаимосвязи между ними; разработка динамической математической модели секции теплообменников с учетом возмущения по расходу сырой нефти, поступающей на установку; получение математического выражения для определения ФЧ в секции отбора дизельного топлива; реализация полученной модели ОУ и САУ в программе *MATLAB/Simulink*; определение настроечных параметров регулятора.

1. Особенности процесса ректификации нефти на исследуемой установке

Описание технологического процесса. Приведем краткое описание технологического процесса атмосферного блока маломощной нефтеперерабатывающей установки (до 500 тыс. т). После блока стабилизации отбензиненная нефть поступает на четвертую тарелку АК. С тринадцатой тарелки АК отбирается дизельная фракция. Между седьмой и восьмой тарелками расположена накопительная тарелка, с которой производится отбор атмосферного газойля. В колонну подается перегретый водяной пар.

Пары бензина, отводимые с верха колонны, конденсируются в аппарате воздушного охлаждения и поступают в рефлюксную емкость. Для поддержания температуры верха колонны в пределах 125–140 °С прямогогонный бензин подается на орошение. Фракция дизельного топлива отбирается с тринадцатой тарелки колонны с температурой 210–240 °С, часть которой подается в отпарную колонну для дополнительной отгонки легких фракций и стабилизации. Другая часть

охлаждается сырой и обессоленной нефтью в теплообменниках и в качестве внутреннего циркуляционного орошения возвращается на шестнадцатую тарелку АК. Высококипящие нефтяные остатки стекают по тарелкам отгонной части в куб колонны. Мазут из куба колонны с температурой 300–340 °С насосами подается в печь, затем в вакуумную колонну [11, 12].

Особенности технологического процесса малотоннажной установки. Как видим, особенностью вышеописанной нефтеперерабатывающей установки малой мощности является организация потоков циркуляционного орошения и отбора нефтепродуктов. Стандартные схемы отвода тепла с промежуточным циркуляционным орошением (как в крупнотоннажных установках [13]) не применяются. На маломощной установке сырая нефть подается на блок теплообменников (рис. 1), где проходит по трубному пространству теплообменника Т-2, там подогревается дизельным топливом (циркуляционным орошением АК).

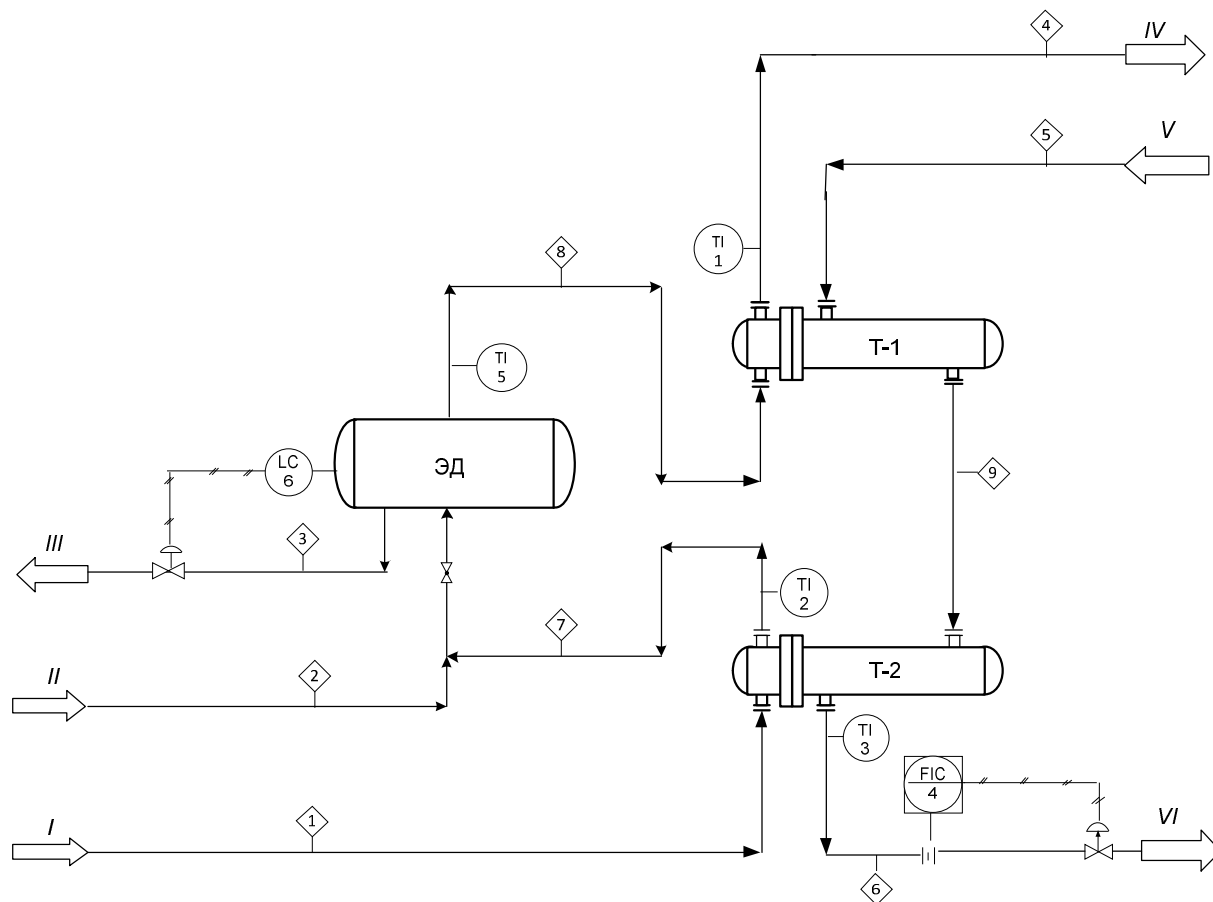


Рис. 1. Схема автоматизации секции теплообменных аппаратов циркуляционного орошения:
 Т-1 – теплообменник 1; Т-2 – теплообменник 2; ЭД – электродегидратор; I – сырая нефть в теплообменник Т-2; II – вода в ЭД; III – соленая вода из ЭД; IV – обессоленная нефть на стабилизацию; V – дизельное топливо из АК; VI – дизельное топливо в АК; TI1, TI2, TI3, TI5 – датчики температуры; FIC4 – регулятор расхода циркуляционного орошения дизельного топлива; LC6 – регулятор межфазного уровня; 1 – параметры потока сырой нефти на входе Т-2; 2 – параметры потока промывочной воды на входе ЭД; 3 – параметры потока соленой воды на выходе ЭД; 4 – параметры потока нефти на выходе Т-1; 5 – параметры потока дизельного топлива из АК в Т-1; 6 – параметры потока дизельного топлива в АК из Т-2 (возврат ЦО); 7 – параметры потока сырой нефти из Т-2 в ЭД; 8 – параметры потока обессоленной нефти из ЭД в Т-1; 9 – параметры потока дизельного топлива из Т-1 в Т-2 (значения параметров 1–9 приведены в таблице)

Fig. 1. Scheme of automation of the section of heat exchangers for circulation flash:
 T-1 – heat exchanger 1; T-2 – heat exchanger 2; EDM – electric dehydrator; I – crude oil in the heat exchanger T-2; II – water in EDM; III – salt water from EDM; IV – desalted crude oil for stabilization; V – diesel oil from AT; VI – diesel oil from AT; TI1, TI2, TI3, TI5 – temperature sensors; FIC4 – diesel oil circulation flash flow regulator; LC6 – interphase level regulator; 1 – stream variables of crude oil at T-2 inlet; 2 – stream variables of drilling water at EDM inlet; 3 – stream variables of salty water at EDM outlet; 4 – stream variables of oil at T-1 outlet; 5 – stream variables of diesel oil from AT to T-1; 6 – stream variables of diesel oil in AT from T-2 (returning of circulating reflux); 7 – crude oil stream variables from T-2 to electrical dehydrator; 8 – desalted oil stream variables from electrical dehydrator to T-1; 9 – diesel oil stream variables from T-1 to T-2 (stream variables 1–9 are given in the table)

После теплообменника Т-2 сырая нефть с температурой 100–120 °С поступает в электродегидратор (ЭД), в котором предусмотрены линии со смесительными устройствами для ввода водонефтяной смеси. Для снижения концентрации растворенных солей и предотвращения их отложения в теплообменниках из емкости в линию сырой нефти перед ЭД подается промывочная вода в количестве 4 % от расхода сырой нефти. Обезвоженная и обессоленная нефть выводится с верха ЭД и проходит через трубное пространство теплообменника Т-1, где подогревается дизельным топливом.

2. Разработка математической модели секции теплообменников циркуляционного орошения и электродегидратора

Выбор параметров объекта управления. Исходя из вышеприведенного описания технологического процесса, разделим параметры, относящиеся к блоку теплообменников Т-1 и Т-2, на группы параметров. Обозначения параметров приведены в соответствии с номерами потоков на рис. 1.

Все параметры ОУ можно разделить на следующие взаимосвязанные группы:

1. Входные параметры: F_1 – расход сырой нефти; F_5 – расход циркуляционного орошения (дизельного топлива).

2. Промежуточные параметры: T_4 – температура сырой нефти на выходе Т-1; T_6 – температура дизельного топлива в АК из Т-2 (возврат ЦО); T_7 – температура сырой нефти из Т-2 в ЭД; T_8 – температура обессоленной нефти из ЭД в Т-1; T_9 – температура дизельного топлива из Т-1 в Т-2; $T_{st.2}$ – температура стенки трубок Т-2; $T_{st.1}$ – температура стенки трубок Т-1.

3. Выходной параметр: R – флегмовое число секции отбора дизельного топлива.

Для удобства при составлении математической модели входные параметры объединим в вектор \mathbf{u} , промежуточные – в вектор \mathbf{x} , \mathbf{y} – выходной параметр:

$$\{F_1, F_5\} \in \mathbf{u};$$

$$\{T_4, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{st.2}, T_{st.1}\} \in \mathbf{x};$$

$$\{R\} \in \mathbf{y}.$$

Получение системы уравнений динамической математической модели секции теплообменников. На атмосферном блоке рассматриваемой нефтеперерабатывающей установки применяются противоточные кожухотрубные теплообменники. Составим математическую модель секции теплообменников с учетом взаимосвязей выбранных параметров.

Рассмотрим секцию теплообменников системы циркуляционного орошения атмосферной колонны как объект с сосредоточенными параметрами. Динамическую модель секции кожухотрубных теплообменников для нагрева нефти циркуляционным потоком дизельного топлива определим в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) теплового баланса:

$$\begin{aligned} \rho_6 V_6 c_6 \frac{d(\Delta T_6)}{dt} &= -\alpha_{t2} S (\Delta T_6 - \Delta T_{st.2}) - c_6 F_{6,0} \Delta T_6 + c_9 F_{9,0} \Delta T_9; \\ \rho_{st} V_{st} c_{st} \frac{d(\Delta T_{st.2})}{dt} &= \alpha_{t2} S (\Delta T_6 - \Delta T_{st.2}) - \alpha'_{t2} S' (\Delta T_{st.2} - \Delta T_7); \\ \rho_7 V_7 c_7 \frac{d(\Delta T_7)}{dt} &= \alpha'_{t2} S' (\Delta T_{st.2} - \Delta T_7) + c_1 T_{1,0} \Delta F_1 - c_7 F_{7,0} \Delta T_7; \\ \rho_9 V_9 c_9 \frac{d(\Delta T_9)}{dt} &= -\alpha_{t1} S (\Delta T_9 - \Delta T_{st.1}) - c_9 F_{9,0} \Delta T_9 + c_5 T_{5,0} \Delta F_5; \\ \rho_{st} V_{st} c_{st} \frac{d(\Delta T_{st.1})}{dt} &= \alpha_{t1} S (\Delta T_9 - \Delta T_{st.1}) - \alpha'_{t1} S' (\Delta T_{st.1} - \Delta T_4); \\ \rho_4 V_4 c_4 \frac{d(\Delta T_4)}{dt} &= \alpha'_{t1} S' (\Delta T_{st.1} - \Delta T_4) + c_8 F_{8,0} \Delta T_8 - c_4 F_{4,0} \Delta T_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); F – расход, кг/с; h – энтальпия, Дж/кг; S – наружная поверхность теплообмена, м²; S' – внутренняя поверхность теплообмена, м²; T – температура, °С; t – время, с; V – объем, м³; α – коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива, Вт/(м²·К);

α' – коэффициент теплоотдачи к нефти, Вт/(м²·К); Δ – отклонение; ρ – плотность, кг/м³; индексы: 0 – номинальное значение параметра; 1–9 – номера потоков; st.t1 – стенки трубок теплообменника Т-1; st.t2 – стенки трубок теплообменника Т-2.

Систему ОДУ (1) дополним уравнением динамики температуры обессоленной нефти на выходе из ЭД:

$$(\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3) \frac{d(\Delta T_8)}{dt} = c_7 F_{7,0} \Delta T_7 - c_8 F_{8,0} \Delta T_8 - c_3 F_{3,0} \Delta T_3. \quad (1a)$$

Преобразуем систему ОДУ (1), (1a) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{dT_6(t)}{dt} &= -a_{(1)} T_6(t) + a_{(2)} T_{st.t2}(t) + a_{(3)} T_9(t); \\ \frac{dT_{st.t2}(t)}{dt} &= -a_{(4)} T_{st.t2}(t) + a_{(5)} T_6(t) + a_{(6)} T_7(t); \\ \frac{dT_7(t)}{dt} &= -a_{(7)} T_7(t) + a_{(8)} T_{st.t2}(t) + b_{(1)} F_1(t); \\ \frac{dT_9(t)}{dt} &= -a_{(9)} T_9(t) + a_{(10)} T_{st.t1}(t) + b_{(2)} F_5(t); \\ \frac{dT_{st.t1}(t)}{dt} &= -a_{(11)} T_{st.t1}(t) + a_{(12)} T_9(t) + a_{(13)} T_4(t); \\ \frac{dT_4(t)}{dt} &= -a_{(14)} T_4(t) + a_{(15)} T_{st.t1}(t) + a_{(16)} T_8(t); \\ \frac{dT_8(t)}{dt} &= -a_{(17)} T_8(t) + a_{(18)} T_7(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a_{(1)} &= \frac{\alpha_{12} S + c_6 F_{6,0}}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(2)} = \frac{\alpha_{12} S}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(3)} = \frac{c_9 F_{9,0}}{\rho_6 V_6 c_6}; \quad a_{(4)} = \frac{\alpha_{12} S + \alpha'_{12} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(5)} = \frac{\alpha_{12} S}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \\ a_{(6)} &= \frac{\alpha'_{12} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(7)} = \frac{\alpha'_{12} S' + c_7 F_{7,0}}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad a_{(8)} = \frac{\alpha'_{12} S'}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad a_{(9)} = \frac{c_9 F_{9,0} + \alpha_{11} S}{\rho_9 V_9 c_9}; \quad a_{(10)} = \frac{\alpha_{11} S}{\rho_9 V_9 c_9}; \\ a_{(11)} &= \frac{\alpha_{11} S + \alpha'_{11} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(12)} = \frac{\alpha_{11} S}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(13)} = \frac{\alpha'_{11} S'}{\rho_{st} V_{st} c_{st}}; \quad a_{(14)} = \frac{\alpha'_{11} S' + c_4 F_{4,0}}{\rho_4 V_4 c_4}; \quad a_{(15)} = \frac{\alpha'_{11} S'}{\rho_4 V_4 c_4}; \\ a_{(16)} &= \frac{c_8 F_{8,0}}{\rho_4 V_4 c_4}; \quad a_{(17)} = \frac{c_8 F_{8,0} + c_3 F_{3,0}}{\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3}; \quad a_{(18)} = \frac{c_7 F_{7,0}}{\rho_8 V_8 c_8 + \rho_3 V_3 c_3}; \quad b_{(1)} = \frac{c_1 T_{1,0}}{\rho_7 V_7 c_7}; \quad b_{(2)} = \frac{c_5 T_{5,0}}{\rho_9 V_9 c_9}. \end{aligned}$$

Принимаем условие, что $T_3 = T_8$. Коэффициенты теплоотдачи, поверхность теплообмена, теплоемкость и другие параметры, необходимые для нахождения коэффициентов $a_{(1)}-a_{(18)}$, $b_{(1)}-b_{(2)}$, определены по общепринятым формулам из [14–16], технологического регламента на действующую маломощную установку ЭЛОУ-АВТ. Коэффициент теплоотдачи к нефти для теплообменника Т-1 составляет 668,3 Вт/(м²·К), для теплообменника Т-2 – 602,1 Вт/(м²·К). Коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива для теплообменника Т-1 составляет 812,8 Вт/(м²·К), для теплообменника Т-2 – 760,1 Вт/(м²·К). Определена внутренняя и наружная поверхность теплообмена: 32,91 и 41,68 м² соответственно.

Для нахождения расхода обессоленной нефти F_8 и расхода соленой воды F_3 на выходе ЭД составим уравнение материального баланса ЭД. Согласно ГОСТ 2477–2014 содержание воды в сырой нефти, поступающей на установку, должно быть не более 1 %, в обессоленной нефти – не более 0,02 %.

Исходя из этих условий, составим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} 0,99F_7 &= 0,9998F_8; \\ 0,01F_7 + 0,04F_7 &= F_3 + 0,0002F_8. \end{aligned} \quad (3)$$

Решим систему уравнений (3) в *MATLAB*, используя функцию *mldivide* [17]. На установку поступает сырая нефть в количестве 12,14 кг/с, промывочная вода в количестве 0,4856 кг/с

(4 % от F_7). Получено решение системы (3) для известного значения расхода сырой нефти: $F_8 = 12,02$ кг/с и $F_3 = 0,6046$ кг/с. Найденные значения параметров потоков приведены в таблице.

Параметры потоков
Stream variables

№	ρ , кг/м ³	F , кг/с	T , °С	c , кДж/кг·К
1	874,2	12,14	98,60	1,174
2	998,8	0,4846	93,30	1,079
3	998,8	0,6046	115,7	1,156
4	872,2	12,02	151,2	1,366
5	840,2	8,126	232,7	1,694
6	840,2	8,126	151,2	1,392
7	874,2	12,14	122,9	1,263
8	874,2	12,02	115,7	1,237
9	840,2	8,126	191,6	1,542

Получение математической модели ФЧ. В работе [18] получена секционная модель атмосферной установки малой мощности, включающая посекционные материальные и тепловые балансы и учитывающая состав сырья.

Уравнение теплового баланса для секции дизельного топлива (от 12-й до 23-й тарелки) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} F_B \cdot h_{T12}^V + F_D \cdot h_{T12}^V + F_r \cdot (h_{T12}^V - h_{T13}^L) = \\ = F_B \cdot h_{T23}^V + F_D \cdot h_{T13}^L + F_O \cdot (h_{T23}^V - h_{TO}^L) + F_C \cdot (h_{T13}^L - h_{TC}^L), \end{aligned} \quad (4)$$

где F – расход, кг/с; h – энтальпия, Дж/кг; T – температура, °С; индексы: B – бензиновая фракция из АК (отбор); C – циркуляционное орошение; O – острое орошение; D – дизельное топливо из АК (отбор); r – внутреннее орошение; $T12$, $T13$, $T23$ – температура на 12-й, 13-й и 23-й тарелке АК, °С; TO – температура острого орошения, °С; TC – температура возврата циркуляционного орошения, °С; V – паровая фаза; L – жидкая фаза.

В соответствии с обозначениями параметров в системе (2) принимаем: $F_C = F_5$; $TC = T_6$. Из уравнения (4) можно определить расход внутреннего орошения – флегмы, уходящей с 13-й тарелки АК:

$$F_r = \frac{F_B \cdot h_{T23}^V + F_D \cdot h_{T13}^L + F_O \cdot (h_{T23}^V - h_{TO}^L) + F_5 \cdot (h_{T13}^L - h_{T_6}^L) - (F_B \cdot h_{T12}^V + F_D \cdot h_{T12}^L)}{(h_{T12}^V - h_{T13}^L)}. \quad (5)$$

Для определения энтальпии нефтепродуктов жидкой фазы используется формула Крэга. Для определения энтальпии нефтяных паров используется формула Уэйра и Итона. Отборы бензиновой фракции и дизельного топлива, расход острого орошения могут быть определены из динамической модели процесса ректификации нефти атмосферного блока малого НПЗ, применяемой в структуре системы управления [19]. Математическая модель содержит систему уравнений материального, покомпонентного материального и теплового балансов атмосферного блока.

Затем определим ФЧ R с учетом уравнения (4) в следующем виде:

$$R = \frac{F_r}{F_B + F_D}. \quad (6)$$

Представим систему уравнений (2), (6) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t); \\ y(t) &= f(x(t), u(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом вычисленных коэффициентов $a_{(1)-a_{(18)}}$, $b_{(1)-b_{(2)}}$ (система уравнений (2)) получены следующие матрицы системы (7):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0,1754 & 0,1209 & 0 & 0,06037 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1867 & -0,3729 & 0,1861 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2302 & -0,383 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,1757 & 0,1212 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2073 & -0,4063 & 0,199 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2129 & -0,3622 & 0,1352 \\ 0 & 0 & 0,3677 & 0 & 0 & 0 & -0,352 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 4,018 \\ 3,727 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$y(t) = R.$$

Таким образом, модель (7) состоит из двух частей: линейной части секции теплообменников и электродегидратора, определяющей температуры теплоносителей, и нелинейной выходной части, определяющей ФЧ в зависимости от температур на входе и возврате ЦО, расходов острого орошения и ЦО, отборов нефтяных фракций.

3. Реализация полученной модели в программе MATLAB/Simulink

В MATLAB получена модель объекта (7) в виде *m*-файла, которая подключается в Simulink с помощью библиотечного блока *S-function* (рис. 2).

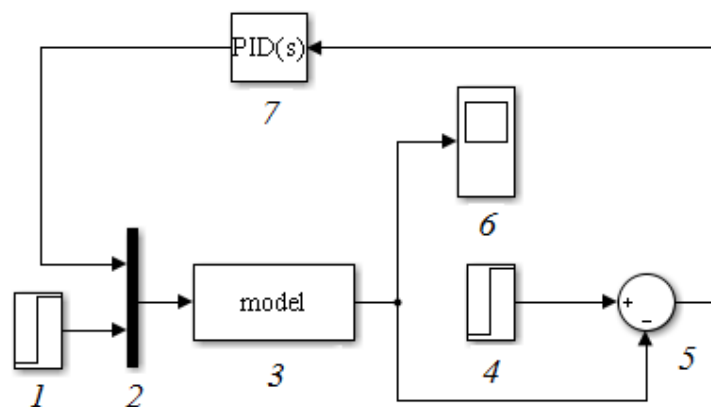


Рис. 2. Динамическая модель секции теплообменников в MATLAB/Simulink:
 1 – блок возмущающего воздействия; 2 – мультиплексор, 3 – модель объекта в Simulink;
 4 – блок задания; 5 – сумматор; 6 – блок для отображения графиков; 7 – регулятор

Fig. 2. Dynamic model of the heat exchanger section in MATLAB/Simulink:
 1 – perturbation action block; 2 – multiplexer, 3 – object model in Simulink; 4 – job block;
 5 – summator; 6 – graph display block; 7 – regulator

В *S*-функции *Flag* указывает задачу, которая должна быть выполнена: *Flag* = 0 – инициализация (задание начальных условий); *Flag* = 1 – вычисление производных (система уравнений (7)); *Flag* = 3 – вычисление выхода *y*.

Зададим исходные данные, разместим в Simulink блоки источников входных сигналов (блоки 1, 4), мультиплексор (блок 2), модель в виде *S-function* (блок 3), дисплей для наблюдения полученных результатов (блок 5), сумматор (блок 6), ПИД-регулятор (блок 7). Поддержание флегмового числа осуществляется путем изменения расхода циркуляционного орошения.

В *Simulink* в *PID*-блоке определяем настройки ПИД-регулятора с помощью инструмента *pidtune*. Заданное значение флегмового числа в секции составляет 0,57. Расход сырой нефти, являющийся возмущением, в момент времени 300 с изменился на 10 %. При входном воздействии построены графики переходных процессов (рис. 3): по параметрам настройки *pidtune* (сплошная линия) и с применением модели (пунктирная линия).

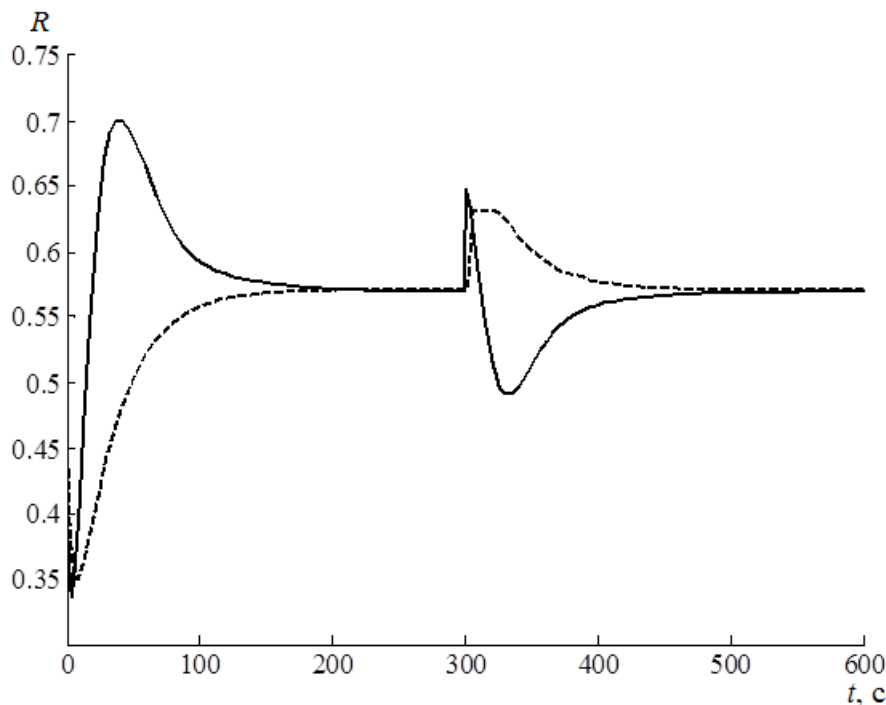


Рис. 3. Графики переходного процесса флегмового числа секции дизельного топлива: сплошная линия – настройка ПИД-регулятора в *MATLAB/Simulink*; пунктирная линия – управление по модели

Fig. 3. Transition graphs for the reflux ratio of the diesel section: solid line – controller of proportional –integrational-differential setting in *MATLAB/Simulink*; phantom line – model control

Результаты получены при потенциальном содержании в составе сырья бензиновой фракции 14,52 %, дизельной фракции – 26,91 %. При изменении состава сырья могут меняться отборы нефтяных фракций, что также учитывается в модели.

Заключение

Получена динамическая модель секции теплообменных аппаратов и электродегидратора в линии циркуляционного орошения атмосферной колонны маломощной нефтеперерабатывающей установки в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В модели учтена зависимость флегмового числа секции дизельного топлива атмосферной колонны от параметров технологического процесса (отборов дизельного топлива и бензиновой фракции, расходов острого и циркуляционного орошения, температур верха колонны, острого орошения, входа и возврата циркуляционного орошения). Выполненная в программном пакете *MATLAB/Simulink* модель объекта позволяет исследовать режимы работы установки.

Полученная модель САР может применяться при управлении атмосферным блоком нефтеперерабатывающей установки в условиях воздействия возмущений для улучшения эффективности разделения нефтяных смесей путем стабилизации флегмового числа. На рис. 3 показаны графики переходных процессов для случая настройки параметров ПИД-регулятора в *MATLAB/Simulink* и модели в контуре управления, из чего видно, что показатели переходных процессов в приведенных случаях отличаются.

Литература

1. Шаровина, С.О. Управление температурным профилем ректификационной колонны тарельчатого типа / С.О. Шаровина // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2013. – № 3. – С. 39–47.
2. Основные решения и преимущества СУУТП компании Июкогава / М.Р. Хатимов, А.В. Богачев, Б.М. Низамеев, Д.А. Рыжов // *Экспозиция нефть и газ*. – 2015. – № 5 (44). – С. 92–95.
3. Дмитриевский, Б.С. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения / Б.С. Дмитриевский, А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329, № 2. – С. 136–145.
4. Sahoo, A. Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger / A. Sahoo, T.K. Radhakrishnan, C. Sankar Rao // *International Conference on Separation Technologies in Chemical, Biochemical, Petroleum and Environmental Engineering*. – Tomsk, 2017. – Vol. 3. – P. 124–132.
5. Степанец, А.В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А.В. Степанец // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/10 (56). – С. 14–17.
6. Skogestad, S. Probably the best simple PID tuning rules in the world / S. Skogestad // *Journal of Process Control*. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–27.
7. Кривошеев, В.П. Математическое моделирование процесса циклической ректификации бинарных смесей при непрерывной подаче потоков в колонну / В.П. Кривошеев, А.В. Ануфриев // *Теоретические основы химической технологии*. – 2018. – Т. 52, № 3. – С. 251–259.
8. Гончаров, А.А. Определение транспортного запаздывания при получении виртуального анализатора для процесса ректификации нефти / А.А. Гончаров, Л.Г. Тугашова, И.В. Жуков // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. – 2018. – № 8. – С. 10–14.
9. Скороспешкин, М.В. Адаптивная система регулирования температуры кожухотрубного теплообменника / М.В. Скороспешкин, Г.П. Цанко, В.Н. Скороспешкин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 151–156.
10. Giwa, A. Decoupling PID Control of a Reactive Packed Distillation Column / A. Giwa, S. Karacan // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2012. – Vol. 1 (6). – P. 1924–1933.
11. Тугашова, Л.Г. Исследование возможности управления процессом ректификации нефти с применением типовых регуляторов / Л.Г. Тугашова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 120–131. DOI: 10.14529/ctcr160313
12. Тугашова, Л.Г. Разработка Matlab-модели аппарата воздушного охлаждения процесса атмосферной перегонки нефти / Л.Г. Тугашова // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 105–111.
13. Ясавеев, Х.Н. Модернизация установок переработки углеводородных смесей / Х.Н. Ясавеев, А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2004. – 307 с.
14. Булыгин, Ю.А. Теплообменные аппараты в нефтегазовой промышленности / Ю.А. Булыгин, С.С. Баранов. – Воронеж: ВГТУ, 2015. – 100 с.
15. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб.: Химия, 1993. – 288 с.
16. Антипов, А.И. Тепловой расчет технологических линий и теплотехнического оборудования объектов промышленной подготовки / А.И. Антипов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2002. – 284 с.
17. Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
18. Тугашова, Л.Г. Моделирование системы управления ректификационной колонной в среде Matlab / Л.Г. Тугашова // *Новый Университет. Серия: Технические науки*. – 2016. – № 8–9 (54–55). – С. 18–24.
19. Затонский, А.В. Управление атмосферной колонной малого нефтеперерабатывающего завода с применением динамической модели / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Интернет-журнал «Наукоедение»*. – 2017. – Т. 9, № 1. – <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>.

Тугашова Лариса Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, tugashova@yandex.ru.

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Пермский край; zxenon@narod.ru.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr200411

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC REFLUX RATIO REGULATION SYSTEM FOR THE RECTIFICATION COLUMN

L.G. Tugashova¹, tugashova@yandex.ru,

A.V. Zatonskiy², zxenon@narod.ru

¹ Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, Russian Federation,

² Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Perm region, Russian Federation

Introduction. This article provides an overview of the methods of managing the primary petroleum refining. To improve separation efficiency was proposed to stabilize the reflux ratio in the rectifying column. **Purpose of work.** To develop a system for automatic regulation of the reflux ratio of diesel fuel sections in an atmospheric column of the refinery oil. To study the operating modes of an atmospheric column with the participation of the obtained automatic control system. **Materials and methods.** The article presented the features of the oil rectification process at the atmospheric unit of a small capacity refinery. The features of heat dissipation with intermediate circulation flash compared to a large-capacity unit will be shown in this article. The parameters of the facility were selected and divided into groups. A dynamic model of the section of shell-and-tube heat exchangers for heating oil with diesel fuel at a low-power refinery unit in the form of differential equations of heat balance has been developed to achieve the goal set work. An electrode dehydrator material balance equation has been compiled to find desalted oil consumption and saltwater consumption. The dependence of the reflux ratio of diesel fuel sections of the atmospheric column on the inlet and outlet temperatures of the atmospheric column circulation flash, the acute fractionation consumption, circulation flash, and oil fraction selection was obtained. The resulting model of the facility consists of two parts: the linear part of the electric dehydrator and heat exchanger section, which determines the temperatures of the coolants, and the nonlinear output part, which determines the reflux ratio depending on technological parameters. The proposed model makes it possible to investigate the effect of disturbances on the controlled parameters. The *MATLAB/Simulink* software product has been chosen as a tool to implement the model. A system of automatic regulation of the reflux ratio in *MATLAB/Simulink* has been built with the participation of the developed model of the study object. **Conclusion.** The results of modeling a system for automatic regulation of the reflux ratio of diesel fuel sections in the atmospheric column of a low-power refinery unit has been obtained, taking into account the peculiarities of the process under disturbance conditions.

Keywords: fractionation, model control, heat exchanger, circulation flash, reflux ratio, dynamic model, parameter.

References

1. Sharovina S.O. [Control of the Temperature Profile of a Poppet-Type Distillation Column]. *Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2013, no. 3, pp. 39–47. (in Russ.)
2. Hatimov M.R., Bogachev A.V., Nizameev B.M., Ryzhov D.A. [Key Decisions and Benefits SUTP Company Yokogawa]. *Oil and Gas Exposition*, 2015, no. 5 (44), pp. 92–95. (in Russ.)
3. Dmitrievskiy B.S., Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. [The Task of Controlling the Process of Oil Rectification and the Method of Its Solution]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 136–145. (in Russ.)

4. Sahoo A., Radhakrishnan T.K., Sankar Rao C. Modeling and Control of a Real Time Shell and Tube Heat Exchanger. *International Conference on Separation Technologies in Chemical, Biochemical, Petroleum and Environmental Engineering*. Tomsk, 2017, vol. 3, pp. 124–132.
5. Stepanec A.V. [A Regulating Adaptive Complex Based on a Cascade System with a Model of a Controlled Object]. *Eastern-European Journal of Advanced Technologies*, 2012, no. 2/10 (56), pp. 14–17. (in Russ.)
6. Skogestad S. Probably the Best Simple PID Tuning Rules in the World. *Journal of Process Control*, 2001, vol. 1, pp. 1–27.
7. Krivosheev V.P., Anufriev A.V. [Mathematical Modeling of the Cyclic Distillation of Binary Mixtures with a Continuous Supply of Streams to the Column]. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 307–315. (in Russ.)
8. Goncharov A.A., Tugashova L.G., Zhukov I.V. [Determination of Transport Lag when Obtaining a Virtual Analyzer for the Process of Oil Rectification]. *Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Best Practices*, 2018, no. 8, pp. 10–14. (in Russ.)
9. Skorospeshkin M.V., Capko G.P., Skorospeshkin V.N. [Adaptive Temperature Control System for Shell-and-tube Heat Exchanger]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 5, pp. 151–156. (in Russ.)
10. Giwa A., Karacan S. Decoupling PID Control of a Reactive Packed Distillation Column. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2012, vol. 1 (6), pp. 1924–1933.
11. Tugashova L.G. Management Feasibility of Oil Fractionation Process Using Standard Controllers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 120–131. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160313
12. Tugashova L.G. [Development of a Matlab-Model of an Air-Cooling Apparatus for the Atmospheric Distillation of Oil]. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 105–111. (in Russ.)
13. Yasaveev H.N., Laptev A.G., Farahov M.I. *Modernizaciya ustanovok pererabotki uglevodorodnyh smesey* [Modernization of Units for Processing Hydrocarbon Mixtures]. Kazan, FEN Publ., 2004. 307 p.
14. Bulygin Yu.A., Baranov S.S. *Teploobmennyye apparaty v neftegazovoy promyshlennosti* [Heat Exchangers in the Oil and Gas Industry]. Voronezh, VSTU, 2015. 100 p.
15. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M., Kurochkina M.I. *Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tekhnologii* [Methods for Calculating Processes and Devices of Chemical Technology]. St. Petersburg, Chemistry Publ., 1993. 288 p.
16. Antipov A.I. *Teplovoj raschet tekhnologicheskikh linij i teplotekhnicheskogo oborudovaniya ob"ektov promyslovoj podgotovki* [Thermal Calculation of Technological Lines and Heating Equipment of Field Preparation Facilities]. Kazan, FEN Publ., 2002. 284 p.
17. D'yakonov V.P. *MATLAB. Polnyj samouchitel'* [MATLAB. Complete Tutorial]. Moscow, Press Publ., 2012. 768 p.
18. Tugashova L.G. [Modeling a Rectification Column Control System in Matlab]. *New University. Series: Engineering Sciences*, 2016, no. 8–9 (54–55), pp. 18–24. (in Russ.)
19. Zatonsky A.V., Tugashova L.G. [Control of the Atmospheric Column of a Small Oil Refinery Using a Dynamic Model]. *Internet journal "Naukovedenie"*, 2017, vol. 9, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>. (in Russ.)

Received 30 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тугашова, Л.Г. Разработка системы автоматического регулирования флегмового числа ректификационной колонны / Л.Г. Тугашова, А.В. Затонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 104–114. DOI: 10.14529/ctcr200411

FOR CITATION

Tugashova L.G., Zatonskiy A.V. Development of an Automatic Reflux Ratio Regulation System for the Rectification Column. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 104–114. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200411