

Для цитирования: Гебель Е.С., Ибатуллин А.А., Пешко М.С., Гудинов В. Н. Постановка задачи синтеза модели прогнозного управления атмосферной трубчаткой. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46 (4): 75-83. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83.

For citation: E.S.Gebel, A.A.Ibatullin, M.S.Peshko, V.N.Gudinov. Synthesising the model of the predictive maintenance of atmospheric pipe still. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (4): 75-83. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-4-75-83

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА МОДЕЛИ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ТРУБЧАТКОЙ

Гебель Е.С., Ибатуллин А.А., Пешко М.С., Гудинов В.Н.

*Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр-т Мира, д. 11, Россия*

Резюме. Цель. Рассматриваются вопросы разработки модели системы прогнозного управления, обеспечивающей стабилизацию выходных параметров ректификационной установки большой мощности. **Метод.** Для достижения поставленной цели предлагается свести задачу управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом на отборных тарелках, в этом случае задания по температуре будут рассматриваться, как управляющие воздействия. Для реализации предлагаемого принципа управления построена математическая модель, позволяющая перейти от содержания фракций в нефти к непосредственно контролируемым температурам. **Результат.** На основе анализа технологического процесса и конструктивных особенностей атмосферной колонны определены вектора управляющих и возмущающих воздействий, а также критерий оптимизации для задачи управления. Предложено ввести в модель прогнозного управления параметры качества нефтепродуктов, а также дополнить существующие контуры регулирования промежуточными параметрами для улучшения динамических характеристик объекта управления. **Вывод.** Проведенный анализ конструктивных особенностей атмосферной трубчатки и существующего подхода к управлению ректификационной колонной выявил недостатки, связанные с отсутствием оперативного контроля качества отбираемых нефтепродуктов, а также необходимость расширения перечня стабилизируемых технологических параметров с целью оптимизации технологического процесса. Показано, что для перехода на управление по модели требуется разработать статическую модель, отражающую зависимость потенциального выхода требуемых фракций от состава сырья, и динамическую модель в виде многопараметрической оптимизационной задачи.

Ключевые слова: нефтепереработка, управление по модели, статическая и динамическая модель, ректификация

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT SYNTHESISING THE MODEL OF THE PREDICTIVE MAINTENANCE OF ATMOSPHERIC PIPE STILL

E.S. Gebel, A.A. Ibatullin, M.S. Peshko, V.N. Gudinov
Omsk State Technical University,
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

Abstract. Objectives. The aim of the study is to develop a model of a predictive maintenance system allowing the output parameters of a high-capacity distillation unit to be stabilised. **Method.** The problem of controlling the collection of oil products of a given fractional composition can be reduced to the task of controlling the temperature regime at draw-off trays. In this case, temperature control tasks are considered as control actions. In order to implement the proposed control principle, a mathematical model was constructed allowing the oil fraction content to be converted to directly controlled temperatures. **Results.** Based on the analysis of the technological process and design features of the atmospheric distillation column, the vectors of maintaining and disturbing actions are determined along with the optimisation criterion for the maintenance problem. In order to improve the dynamic characteristics of the control object, oil product quality parameters are introduced into the predictive maintenance model along with the supplementation of existing control loops with intermediate parameters. **Conclusion.** An analysis of the structural features of the atmospheric pipe still and the existing approach to the distillation column maintenance reveals certain disadvantages associated with the lack of operational quality control of the collected oil products, as well as the need to expand the list of stabilised technological parameters in order to optimise the technological process. It is shown that in order to switch to the proposed maintenance approach, it is necessary to develop a static model reflecting the dependency of the potential yield of the required fractions on the raw material composition along with a dynamic model in the form of a multi-parameter optimisation problem.

Keywords: oil refining, model maintenance, static and dynamic model, rectification

Введение. Основная задача переработки нефти заключается в увеличении выхода светлых фракций (бензиновой, керосиновой и дизельной фракций с температурой кипения до 360°C), потенциальных выход которых на большинстве российских нефтеперерабатывающих предприятиях составляет 45-60% на нефть. При этом некоторые современные отечественные и большинство зарубежных производств обеспечивают глубину переработки нефти до 90% и более [1, 4, 16].

Для повышения показателя эффективности процесса нефтепереработки применяются деструктивные методы, например коксование, гидрокрекинг и другие, требующие значительных финансовых затрат и, как следствие, доступные только крупным организациям [2, 8]. Отличительными особенностями современной автоматизации является достижение предельных показателей, которые могут быть получены техническими средствами и классическими подходами к регулированию технологических параметров.

Постановка задачи. Для оптимизации технико-экономических показателей производства в свете общего насыщения рынка, усиления конкуренции, введения новых экологических норм и стандартов, а также общего удорожания стоимости производства необходим переход на современные методы усовершенствованного управления, позволяющие оптимизировать процесс за счет более широкого применения прогнозных многопараметрических динамических моделей систем управления с учетом показаний виртуальных анализаторов качества в реальном режиме времени [1, 3, 6, 14, 15].

Таким образом, наиболее перспективным с точки зрения увеличения глубины переработки нефти, достижения требуемого количества и качества выпускаемых нефтепродуктов является использование дополнительных программных надстроек, которые на основе статических и динамических моделей технологического процесса позволят стабилизировать параметры не

только на технологически допустимом уровне, но и в наиболее экономически эффективном состоянии равновесия.

Методы исследования. Анализ исходных данных задачи. Объектом управления в исследуемой системе управления процессом ректификации нефти является атмосферная трубчатка К1 с блоком электрообессоливания (рис. 1) производительностью порядка 5 млн. тонн в год, предназначенная для переработки смеси западносибирских нефтей по топливному варианту. В блоке атмосферной перегонки нефти происходит первичное фракционирование обессоленной нефти с получением бензиновой, керосиновой и дизельной фракций, выкипающих при температуре до 360°C.

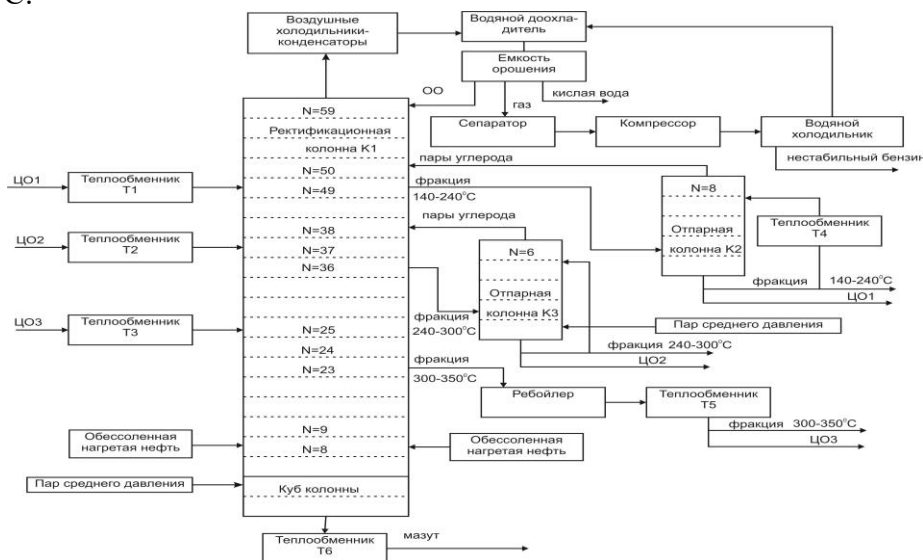


Рис.1. Схема потоков ректификационной установки
Fig. 1. Flow diagram of distillation plant

На установке перегонка нефти осуществляется по схеме с предварительным испарением, т.е. часть легких бензиновых фракций после нагрева обессоленной нефти в теплообменниках отделяется от нефти в предварительной емкости испарения, и, минуя печь, подается на разделение в сложную атмосферную колонну К1 вместе с частично отбензиненной нефтью. В результате получают следующие основные фракции:

- головной погон нестабильный бензин;
- боковой погон фракция 140-240 °С;
- боковой погон фракция 240-300 °С;
- боковой погон фракция 300-350 °С;
- нижний (кубовый) продукт – мазут.

Для снижения концентрации низкокипящих компонентов в мазуте, снижения парциального давления и повышения четкости ректификации в нижнюю часть ректификационной колонны К1 подается водяной пар среднего давления. В его присутствии углеводороды нефти испаряются при более низкой температуре. Боковые погоны ректификационной колонны (кроме фракции 300-350 °С) выводятся каждый в свою отпарную колонну (стриппинг-секцию) К2 и К3, где осуществляется дополнительное удаление части легких компонентов, что позволяет повысить четкость разделения погонов.

Стриппинг-секции (К2 и К3), используемые в технологическом процессе, выполняют функцию буферных емкостей, предназначены для более равномерного отбора боковых погонов при колебаниях режима атмосферной колонны К1.

В связи с тем, что отбор боковых погонов происходит в жидкой фазе, которая в процессе теплообмена поглощает тепло газового потока, в ректификационной колонне К1 нарушается тепловой баланс. Для его восстановления предусмотрены промежуточные циркуляционные орошения (ЦО1, ЦО2 и ЦО3) в зоне отборов боковых погонов. Имеется также острое орошение верха колонны. Циркуляционное орошение представляет собой поток флегмы, который отбира-

ется с одной из тарелок (№49, №36 и №23), охлаждается в теплообменных аппаратах, затем возвращается в колонну К1 на ту же или вышележащую тарелку.

Входные и выходные параметры объекта управления – ректификационной колонны К1, а также внешние возмущения и связь между ними, показаны на рис. 2.

Цель управления ректификационной установкой заключается в достижении максимального отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава в условиях переменного расхода и состава сырьевых потоков и теплоносителей (рис.1). В соответствии с ассортиментом выпускаемых на предприятии нефтепродуктов критерий оптимизации – отбор на нефть (или относительный отбор, выраженный в процентах) заданных фракций, запишем следующим образом:

$$\Phi = F_0 + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \rightarrow \max. \quad (1)$$

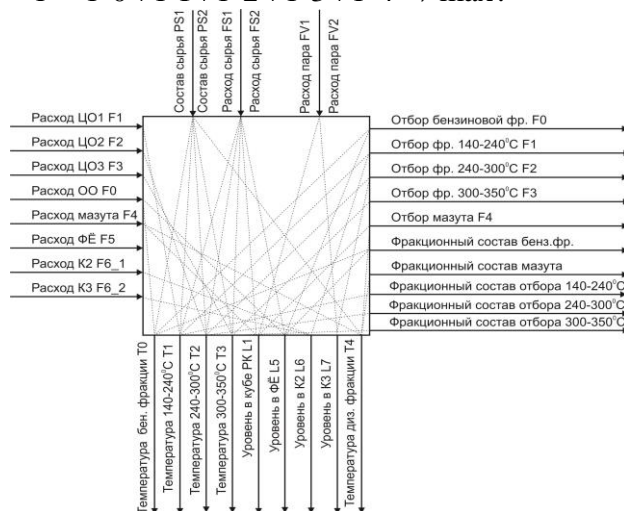


Рис. 2. Взаимосвязи параметров объекта управления

Fig. 2. The relationship of the parameters of the control object

Постановка задачи управления. В процессе эксплуатации ректификационных установок (рис. 1), содержащих помимо колонны К1 (в нашем случае тарельчатого типа), еще и большое количество дополнительного технологического оборудования, например воздушные холодильники концентраторы, рефлюксную емкость, отпарные колонны К2 и К3 и т.д., технологические параметры в силу постоянно действующих контролируемых возмущений по каналу питания, подачи тепло- и хладоносителя, а также других внешних случайных воздействий постоянно изменяются во времени.

Таким образом, процесс ректификации представляет собой сложный динамический объект управления с ярко выраженной распределенностью параметров по температуре, концентрации, составу, давлению, который постоянно находится в динамическом режиме работы [7, 10]. Внешние возмущения, такие как изменение температуры, давления, состава сырья, теплофизических характеристик теплоносителей, приводят к необходимости непрерывного изменения технологического режима работы ректификационной колонны, т.е. коррекции основных входных параметров, а именно расходов циркуляционных и острого орошения, отборов фракций, расходов сырья и пара.

Автоматическое регулирование процесса ректификации – одна из наиболее трудоемких задач, возникающих при автоматизации химических производств, что объясняется сложным характером технологического процесса, взаимной зависимостью основных регулируемых параметров, а также большой инерционностью и запаздыванием, присущим ректификационным колоннам, как объектам управления [2]. Наиболее ответственным с точки зрения выхода требуемого объема и качества продукта заданного фракционного состава является температурный профиль колонны, что отмечено во многих научных публикациях [5, 9, 12]. На практике установлено, что управляющие воздействия, направленные на стабилизацию температуры и давления наверху и внизу ректификационной колонны, обеспечивают заданную концентрацию компонентов, т.е. выход требуемых готовых продуктов.

Задача управления атмосферной установкой ректификации нефти формулируется следующим образом: найти оптимальные решения по управлению атмосферной трубчаткой, при которых достигается максимум отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава Φ (1) с учетом воздействия внешних возмущений V и заданных ограничений на фракционный состав Q :

$$L(T, V, Q, U^*) = \max_U \Phi, \quad (2)$$

где $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ – вектор температур на выходе атмосферной колонны; $V \{FS_1, FS_2, PS_1, PS_2\}$ – вектор возмущающих воздействий, $Q \{T_{нк}^1, T_{кк}^1, T_{нк}^2, T_{кк}^2, T_{нк}^3, T_{кк}^3\}$ – вектор фракционного состава содержит значения температур начала и конца кипения отбираемых фракций, $U \{F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_V\}$ – вектор управляющих воздействий, $U^* \{F_0^*, F_1^*, F_2^*, F_3^*, F_4^*, F_V^*\}$ – вектор решений по управлению. Обозначения приняты в соответствии с введенными на рис. 2.

Обсуждение результатов. Анализ существующих на производстве подходов к управлению атмосферной установкой ректификации нефти показал, что, несмотря на высокое качество получаемых нефтепродуктов, ректификационная колонна работает недостаточно эффективно, поскольку допустимый диапазон варьирования большинства технологических параметров согласно технологическому регламенту достаточно широк, а используемые модели не учитывают воздействие возмущений, взаимосвязанность и распределенность параметров.

На основании выявленных недостатков сделан вывод, что внедрение оперативного контроля качества нефтепродуктов (поскольку результаты лабораторного анализа, поступающие с большой задержкой, приводят к выпуску большого объема некачественной продукции), а также системы управления, обеспечивающей компенсацию возмущений и перекрестных связей является актуальным. Следует учитывать, что практическая реализация компенсаторов возмущений и компенсаторов перекрестных связей весьма затруднительна для объектов управления с большим числом параметров [13]. Для нелинейных объектов с распределенными параметрами, таких как ректификационная колонна, подобные системы управления обеспечивают необходимое качество регулирования только при малых возмущениях [13].

Таким образом, для достижения заданного критерия эффективности предлагается усовершенствовать существующую систему управления процессом ректификации нефти, внедрив модель прогнозного управления, содержащую: расчетные значения показателей качества нефтепродуктов, рассчитанных виртуальными анализаторами, с учетом особенностей рассматриваемой установки; промежуточные параметры в контурах регулирования для улучшения динамических характеристик; управляющие воздействия, определенные по модели процесса, учитывающей взаимосвязь технологических параметров.

Для достижения поставленной цели предлагается свести задачу управления отбором нефтепродуктов заданного фракционного состава к управлению температурным режимом на отборных тарелках, в этом случае задания по температуре будут рассматриваться, как управляющие воздействия. Для реализации предлагаемого принципа управления необходимо построить математическую модель, позволяющую перейти от содержания фракций в нефти к непосредственно контролируемым температурам.

Вектор температур $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ отбираемых нефтяных фракций зависит от состава нефти PS , т.е. потенциального содержания фракций в нефти [5]. Таким образом, задачу управления ректификационной установкой с учетом предлагаемого принципа управления сформулируем следующим образом: определить оптимальные значения температур на отборных тарелках атмосферной колонны, при которых достигается максимум отбора нефтепродуктов заданного фракционного состава с учетом воздействия внешних возмущений V :

$$L(T^*, V, Q, U) = \max_T \Phi, \quad (3)$$

и выполняются уравнения связи $\Phi = f(T(PS))$ и уравнение кривой истинных температур кипения нефти, отражающее ее физико-химические свойства.

Для решения поставленной задачи оптимизации необходимо разработать статическую модель $\Phi = f(T(PS))$, адекватность которой проверить по кривой истинных температур кипения нефти, построенной на основе данных лабораторных исследований.

Ректификационная установка распределенный, инерционный объект регулирования, подверженный значительным возмущениям [11, 17]. Для улучшения качества регулирования требуется совершенствование его информационной структуры системы управления. Общий подход к регулированию температурного режима ректификационной колонны заключается в изменении расхода и температуры циркуляционных орошений, острого орошения и подачи пара. Определим основные контуры регулирования технологических параметров исследуемой ректификационной установки.

Температура верхнего продукта (бензиновой фракции) колонны К1 после аппаратов воздушного охлаждения, которые оборудованы камерами рециркуляции, регулируется изменением частоты вращения двигателей и положением жалюзи воздухозаборников. Стабилизация уровня раздела фаз в флегмовой емкости осуществляется изменением расхода бензиновой фракции из емкости регулятором уровня.

Расход нестабильного бензина (острого орошения) подаваемого насосами в колонну К1 на тарелку №59 стабилизируется регулятором давления с корректировкой уставки по температуре верха основной колонны.

Для улучшения условий работы атмосферной колонны К1 и снятия избыточного тепла предусмотрены три циркуляционных орошения.

Часть фракции 140-240°C направляется для отпарки легких углеводородов в отпарную колонну К2, уровень в которой регулируется клапаном на питающем входе. Отпаренные легкие углеводороды с верха отпарной колонны К2 возвращаются в атмосферную колонну К1 на тарелку №50, предусмотрен контроль текущей температуры потока. Другая часть фракции 140-240°C с тарелки №49 поступает на прием насосов и в виде 1-го циркуляционного орошения подается в теплообменники и, охладившись, возвращается на 49-ю тарелку ректификационной колонны. Расход 1-го ЦО в атмосферную колонну К1 стабилизируется регулятором расхода по заданной температуре потока. Дополнительно контролируется температура на 49-й тарелке.

С тарелки отбора №36 атмосферной колонны К1 выводится фракция 240-300°C, текущее значение температуры потока контролируется. Часть фракции 240-300°C направляется для отпарки легких углеводородов в отпарную колонну К3, основные технологические параметры (давление и температура вверху колонны К3, а также температура в кубе) стабилизируются соответствующими регуляторами.

Отпаренные легкие углеводороды с верха отпарной колонны К3 возвращаются в атмосферную колонну К1 на тарелку №38. Другая часть фракции 240-300°C с тарелки №36, в виде 2-го циркуляционного орошения подается последовательно в ребойлер отпарной колонны К2, затем через теплообменники, где отдает тепло потокам обессоленной нефти и сырой нефти, и, охладившись, возвращается на 37-ю тарелку атмосферной колонны К1 в виде 2-го ЦО. Стабилизация температуры на 37-ой тарелке ректификационной колонны достигается регулированием расхода и температуры потока 2-го ЦО.

С тарелки №23 отбора колонны К1 выводится фракция 300-350°C, текущее значение температуры потока контролируется. Фракция 300-350°C подается последовательно в ребойлеры стабилизационной и фракционирующей колонн, далее в теплообменники для охлаждения. Затем 3-е циркуляционное орошение возвращается в колонну К1 на тарелку №25, значение уставки регулятора расхода 3-го ЦО зависит от температуры входного потока. Для отпарки легких фракций от мазута в нижнюю часть колонны К1 подается водяной пар среднего давления из пароперегревателя печи, технологические параметры (температура и давление) контролируются

ся, а расход регулируется. Уровень в кубе колонны К1 стабилизируется регулятором уровня, который корректирует уставку контура регулирования расхода мазута с установки.

Задача стабилизации температур на отборных тарелках заключается в поддержании температур $T \{T_0, T_1, T_2, T_3, T_4\}$ отбираемых фракций на заданных уровнях в случае нарушения режима работы из-за изменения расхода или состава сырья и теплоносителя. Регулирование осуществляется путем изменения расходов $U \{F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_V\}$. Применение компенсаторов возмущений и перекрестных связей для рассматриваемого объекта управления не обеспечит необходимое качество в силу ранее указанных причин. Таким образом, требуется разработать динамическую модель процесса ректификации и модели показателей качества нефтепродуктов, чтобы реализовать прогнозное управление рассматриваемой ректификационной установкой по модели.

Задачу управления в этом случае сформулируем следующим образом: определить вектор управляющих воздействий, при котором для заданных точек температурного профиля m среднеквадратичное отклонение текущих значений температур T_i отбираемых фракций от заданных значений T_i^* достигнет минимального значения:

$$L(T^*, V, Q, U^*) = \min_{T, U} \left(\sum_{i=1}^m (T_i - T_i^*)^2 \right), \quad (4)$$

при выполнении связей в форме уравнений динамики ректификационного процесса и ограничений на допустимый диапазон варьирования температур фракций с учетом их наложения (пересечения).

Вывод. В работе рассмотрен один из наиболее сложных технологических процессов в нефтехимическом производстве, связанный с разложением нефти на заданные фракции.

Проведенный анализ конструктивных особенностей атмосферной трубчатки и существующего подхода к управлению ректификационной колонной выявил недостатки, связанные с отсутствием оперативного контроля качества отбираемых нефтепродуктов, а также необходимость расширения перечня стабилизируемых технологических параметров с целью оптимизации технологического процесса.

Показано, что для перехода на управление по модели требуется разработать статическую модель, отражающую зависимость потенциального выхода требуемых фракций от состава сырья, и динамическую модель в виде многопараметрической оптимизационной задачи.

Библиографический список:

1. Гебель Е.С. Система усовершенствованного управления газоразделительным аппаратом установки подготовки нефти / Е.С. Гебель, С.Д. Фарунцев // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 3.
2. Глаголева О.Ф. Технология переработки нефти. В 2-х частях. Часть 1. Первичная переработка нефти. – М. : Химия, КолосС, 2006. – 400 с.
3. Диго Г. Б. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации // Информатика и системы управления. – 2011. – №4.
4. Дозорцев, В. М. Усовершенствованное управление технологическим процессом (APC) : 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 1
5. Затонский А. В. Моделирование статического режима процесса ректификации с идентификацией состава и свойств нефти / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 6. – С. 109–116.
6. Елизаров В. И. Построение систем управления процессом ректификации / В. И. Елизаров, С. А. Мерзляков, Р. Р. Шавалеев // Вестник технологического университета, 2015. – т.18. – № 11. – С. 177 – 180.
7. Моделирование на ЭВМ объектов управления нефтепереработки и нефтехимии : учеб. пособие / М. Г. Ахмадеев / Уфа : Изд-во «УНИ», 1989 – 97 с.
8. Патышева, Б. А. Синтез системы управления процессом каталитического крекинга нефти с использованием прогнозирующей модели / Б.А. Патышева // Инженерный вестник Дона, 2013. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485)
9. Семенов А.Д. Идентификация объектов управления : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д.В. Артамонов, А.В. Брюхаев // - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003.- 211 с.

10. Софиева, Ю.Н. Применение пакета моделирующих программ ChemCAD в учебно-тренажерных комплексах для изучения систем автоматизации ректификационных установок / Ю.Н. Софиева, К.В. Абрамов // Инженерный вестник Дона, 2012. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619)
11. Тугашова Л. Г. Динамическая модель процесса ректификации нефти / Л.Г. Тугашова, Н. Н. Алаева // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство. Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. Ч. 2 (28 марта–1 апреля 2016 г.). – Альметьевск: АГНИ, 2016. – С. 21–24.
12. Тугашова Л.Г. Управление процессом ректификации нефти с применением моделей процесса и виртуальных анализаторов / Л.Г. Тугашова, А.А. Гончаров // Нефть и газ, 2018. – № 1. – С. 124 – 132.
13. Чадеев, В. М. Идентификация технологических объектов и системы управления с идентификатором // Автоматизация в промышленности, 2019. №6.
14. Bemporad A. Robust model predictive control: survey / A. Bemporad (etc.) // Robustness in Identification and Control, Volume of Lecture Notes in Control and Information Science. Springer-Verlag. 1999. pp. 207.
15. Marquez-Ruiz A. Model Learning Predictive Control for Batch Process: A Reactive Batch Distillation Column Case Study // A. Marquez-Ruiz, M. Loonen, B. Bahadir Saltik, and L. Ozkan // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2019. URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b06474>.
16. Gonsales, D.D. Dynamic Simulation and Control: Application to Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil Refinery // D.D. Gonsales, F.S. Martins, S. Feyo de Azevedo / 20th European Symp. on Computer Aided Engineering (ESCAPE 20). 2010. 6p.
17. Werlea, L.O. Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column / L.O. Werlea, C. Marangonia, J.G. Telekena, C. Sayera, R.F. Machado // 10th International Symposium on Process System Engineering. 2009. 6p.

References:

1. Gebel' Ye.S. Sistema usovershenstvovannogo upravleniya gazorazdelitel'nym apparatom ustanovki podgotovki nefiti / Ye.S. Gebel', S.D. Faruntsev // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. – 2019. – № 3. [Gebel E.S. Advanced process control system of the oil-gas separator in the crude oil treatment plant / E.S. Gebel, S.D. Faruntsev // Automation in industry. 2019. No. 3. (In Russ)]
2. Glagoleva O.F. Tekhnologiya pererabotki nefiti. V 2-kh chastyakh. Chast' 1. Pervichnaya pererabotka nefiti. – M. : Khimiya, KolosS, 2006. – 400 s. [Glagoleva O.F. Oil refining technology. Intwo parts. Part 1. Primary oil refining. - M.: Chemistry, KolosS, 2006 . 400 p. (In Russ)]
3. Digo G. B. Issledovaniye modeley virtual'nykh analizatorov massoobmennogo tekhnologicheskogo pro-tsessa rektifikatsii // Informatika i sistemy upravleniya. 2011. №4. [Digo G.B. Study of models of virtual analyzers of the mass-exchange technological process of rectification // Informatics and Control Systems. 2011. No. 4. (In Russ)]
4. Dozortsev, V. M. Usovershenstvovannoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom (ARS) : 10 let v Rossii // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2013. № 1 [Dozortsev V. M. Advanced process control (APC): 10 years in Russia // Automation in industry. 2013. No.1(In Russ)]
5. Zatonskiy A. V. Modelirovaniye staticheskogo rezhima protsessa rektifikatsii s identifikatsiyey sosta-va i svoystv nefiti / A.V. Zatonskiy, L.G. Tugashova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. – 2015. – № 6. – С. 109–116. [Zatonsky A. V. Modeling of the static mode of the rectification process with identification of the composition and properties of oil / A.V. Zatonsky, L.G. Tugashova // Proceedings of higher educational institutions. Oil and gas. 2015. No. 6. pp. 109–116. (In Russ)]
6. Yelizarov V. I. Postroyeniye sistem upravleniya protsessom rektifikatsii / V. I. Yelizarov, S. A. Merz-lyakov, R. R. Shavaleyev // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 2015. t.18. № 11. S. 177 – 180. [Elizarov V. I. Design of rectification process control systems/ V. I. Elizarov, S. A. Merzlyakov, R. R. Shavaleev // Bulletin of the Technological University, 2015. vol. 18. No. 11. pp. 177 – 180. (In Russ)]
7. Modelirovaniye na EVM ob"yektov upravleniya neftepererabotki i neftekhimii : ucheb. posobiye / M. G. Akhmadeyev / Ufa : Izd-vo «UNI», 1989 – 97 s. [Simulation of oil refining and petrochemical process: textbook / M. G. Akhmadeev / Ufa: Publishing House "UNI", 1989. 97 p. (In Russ)]
8. Patysheva, B. A. Sintez sistemy upravleniya protsessom kataliticheskogo krekinga nefiti s ispol'zovaniyem prognoziryushchey modeli / B.A. Patysheva // Inzhenernyy vestnik Dona, 2013. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485) [Pashaeva B. A. Synthesis of oil catalytic cracking control system using predictive model / B. A. Pashaeva // Engineering Bulletin of Don, 2013. No. 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1485) (In Russ)]
9. Semenov A.D. Identifikatsiya ob"yektov upravleniya : ucheb. posobiye .A. D. Semenov, D.V. Artamonov, A.V. Bryukhayev // Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003. 211 s. [Semenov A.D. Identification of control system: textbook/ A. D. Semenov, D.V. Artamonov, A.V. Bryukhaev. Penza: Publishing House Penz. SU, 2003. 211 p. (In Russ)]
10. Sofiyeva, YU.N. Primeneniye paketa modeliruyushchikh programm ChemCAD v uchebno-trenazhernykh kompleksakh dlya izucheniya sistem avtomatizatsii rektifikatsionnykh ustanovok / YU.N. Sofiyeva, K.V. Abramov // Inzhenernyy Vestnik Dona, 2012. – № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619) [Sofieva Yu.N. Application of the ChemCAD modeling software in the training complex to study the automatic control system of distillation process / Yu.N. Sofieva, K.V. Abramov // Engineering Journal of Don, 2012. № 1 (URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/619) (In Russ)]

11. Tugashova, L. G. Dinamicheskaya model' protsessa rektifikatsii nefiti / L.G. Tugashova, N. N. Alayeva // Neftegazovyy kompleks: obrazovaniye, nauka i proizvodstvo. Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. CH. 2 (28 marta–1 aprelya 2016 g.). – Al'met'yevsk: AGNI, 2016. – S. 21–24. [Tugashova L.G. Dynamic model of oil rectification process / L. G. Tugashova, N.N. Alayeva // Proceedings of “Oil and gas complex: education, science and production” conf. Part 2 (March 28 – April 1, 2016). Almet'yevsk: ASOI, 2016. pp. 21-24. (In Russ)]

12. Tugashova, L.G. Upravleniye protsessom rektifikatsii nefiti s primeneniye modeley protsessu i virtu-al'nykh analizatorov / L.G. Tugashova, A.A. Goncharov // Neft' i gaz, 2018. – № 1. – S. 124 – 132. [Tugashova L.G. Control of the oil rectification process using process models and soft sensors / L.G. Tugashova, A.A. Goncharov // Oil and gas, 2018. No.1. pp. 124 – 132. (In Russ)]

13. Chadeyev, V. M. Identifikatsiya tekhnologicheskikh ob'yektov i sistemy upravleniya s identifikatorom // Avtomatizatsiya v promyshlennosti, 2019. – №6. [Chadeev V. M. Identification of technological objects and a control system with an identifier // Automation in Industry, 2019. No. 6. (In Russ)]

14. Bemporad, A. Robust model predictive control: survey / A. Bemporad (etc.) // Robustness in Identification and Control, Volume of Lecture Notes in Control and Information Science. Springer-Verlag. 1999. p. 207.

15. Marquez-Ruiz A. Model Learning Predictive Control for Batch Process: A Reactive Batch Distillation Column Case Study // A. Marquez-Ruiz, M. Loonen, B. Bahadir Saltik, and L. Ozkan // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. URL: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b06474>.

16. Gonsales, D.D. Dynamic Simulation and Control: Application to Atmospheric Distillation Unit of Crude Oil Refinery // D.D. Gonsales, F.S. Martins, S. Foyo de Azevedo / 20th European Symp. on Computer Aided Engineering (ESCAPE 20). 2010. 6p.

17. Werlea, L.O. Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column / L.O. Werlea, C. Marangonia, J.G. Telekena, C. Sayera, R.F. Machado // 10th International Symposium on Process System Engineering. 2009. 6p.

Сведения об авторах:

Гебель Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация и робототехника»; e-mail: gebel_es@mail.ru

Ибатуллин Альберт Амирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: ibatullin77@yandex.ru

Пешко Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: nechaet@mail.ru

Гудинов Владимир Николаевич, старший преподаватель, кафедра «Автоматизация и робототехника»; e-mail: gudinov@mail.ru

Information about the authors:

Elena S. Gebel, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Automation and Robotics; e-mail: gebel_es@mail.ru ORCID: 0000-0003-1811-8755

Albert A. Ibatullin, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Automation and Robotics; e-mail: ibatullin77@yandex.ru ORCID: 0000-0002-8910-6412

Michael S. Peshko, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Automation and Robotics; e-mail: nechaet@mail.ru ORCID: 0000-0003-0121-4388

Vladimir N. Gudinov, Senior Lecturer, Department of Automation and Robotics; e-mail: gudinov@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.09.2019.

Принята в печать 21.10. 2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.09.2019.

Accepted for publication 21.10.2019.