

УДК 004.94

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.02

**Е.А. Шулаева, В.Б. Павлов**Филиал Уфимского государственного нефтяного технического  
университета в Стерлитамаке, Стерлитамак, Россия**РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА  
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА АТМОСФЕРНОЙ  
ПЕРЕГОНКИ ТОВАРНОЙ НЕФТИ**

Управление качеством нефтепродуктов является важнейшим условием обеспечения стабильной работы нефтеперерабатывающих предприятий. Основными критериями при контроле технологического процесса являются время определения отклонений оптимальных значений параметров, а также достоверность получаемых данных при анализе технологического процесса. **Цель исследования:** разработка виртуального анализатора управления качеством процесса атмосферной перегонки товарной нефти. **Методы:** рассмотрены три основных метода контроля качества на предмет соответствия критериям времени определения отклонений оптимальных значений параметров и достоверности получаемых данных: проведение анализов в химических лабораториях, применение поточных анализаторов и применение виртуальных анализаторов. Последний метод является наиболее перспективным, кроме прочего, в связи с тем, что интеграция виртуального анализатора в технологический процесс не требует больших затрат. **Результаты:** принцип работы виртуальных анализаторов заключается в непрерывном анализе требуемого показателя качества по математической модели, которая описывает функциональную зависимость с текущими значениями измеряемых технологических переменных. Таким образом, виртуальный анализатор позволяет оценивать не само качество компонентов технологического процесса, а непосредственно необходимые показатели качества продукта по таким измеряемым параметрам технологического процесса, как температура, давление, расход, которые непрерывно контролируются современными системами управления. Для создания математической модели автоматизированной системы управления процессом атмосферной перегонки товарной нефти были получены статистические данные параметров технологического процесса, предположительно имеющих влияние на показатель качества, а также лабораторные данные по качеству целевого продукта. Также был произведен расчет системы регулирования температурой и давлением куба колонны, показаны основные характеристики процесса, определены показатели качества товарной нефти. **Практическая значимость:** внедрение виртуального анализатора управления качеством технологического процесса атмосферной перегонки товарной нефти позволит повысить его эффективность.

**Ключевые слова:** виртуальный анализатор, регрессионный анализ, управление качеством, автоматизированная система регулирования, процесс атмосферной перегонки товарной нефти.

**E.A. Shulaeva, V.B. Pavlov**

Branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak,  
Sterlitamak, Russian Federation

## **DEVELOPMENT OF A VIRTUAL ANALYZER FOR MANAGING THE QUALITY OF THE ATMOSPHERIC DISPLACEMENT OF COMMERCIAL OIL**

The quality management of petroleum products is the most important element in ensuring the stable operation of oil refineries. The main criteria for monitoring the technological process are the time to determine deviations of the optimal parameter values, as well as the reliability of the data obtained during the analysis of the technological process. **Purpose:** Development of the virtual analyzer for quality management of the process of atmospheric distillation of commercial oil. **Methods:** Three main methods of quality control were considered for compliance with the criteria for determining the time of deviations of optimal parameter values and the reliability of the obtained data: analysis in chemical laboratories, the use of in-line analyzers and the use of virtual analyzers. The latter method is the most promising, including due to the fact that the integration of a virtual analyzer into the technological process does not require large costs. **Results:** The principle of operation of virtual analyzers is to continuously analyze the required quality indicator using a mathematical model that describes the functional relationship with the current values of the measured technological variables. Thus, the virtual analyzer allows you to evaluate not the quality of the components of the technological process itself, but directly connects the necessary product quality indicators by such measured parameters of the technological process as temperature, pressure, flow, continuously controlled by modern control systems. To create a mathematical model of an automated control system for the process of atmospheric distillation of commercial oil, statistical data of the process parameters were obtained, presumably having an impact on the quality indicator, as well as laboratory data on the quality of the target product. The calculation of the control system for the temperature and pressure of the column cube was also performed, the main characteristics of the process were shown, and the quality indicators of commercial oil were determined. **Practical relevance:** The introduction of a virtual quality management analyzer for the technological process of atmospheric distillation of commercial oil will increase its efficiency.

**Keywords:** virtual analyzer, regression analysis, quality management, automated control system, process of atmospheric distillation of commercial oil.

### **Введение**

В ходе технологического процесса уровень качества получаемой товарной нефти нормируется, что позволяет гарантированно обеспечить необходимое качество выходных товарных продуктов. Таким образом, существует необходимость осуществлять контроль качества получаемой товарной нефти на всех этапах технологического процесса [1].

На сегодняшний день существуют три основных способа контроля показателей качества, которые используются при оценке качества выходных продуктов, в том числе лабораторные анализы, данные точных анализаторов, данные виртуальных анализаторов [2]. Каждый

из перечисленных способов контроля качества имеет свои преимущества и недостатки, а также сферы применения.

Рассматривая технологический процесс производства товарной нефти, следует отметить, что существует множество факторов, определяющих его нестабильность во времени, т.е. присутствуют периодические отклонения от оптимальных рабочих параметров. Данный факт требует осуществления непрерывного контроля технологического процесса и его подстройки [3].

### **1. Сравнительный анализ способов контроля показателей качества**

Проведение анализов в химических лабораториях исторически стало первым способом управления качеством выходных продуктов в ходе технологического процесса производства нефтепродуктов. Однако достоверность результатов анализов, полученных в химических лабораториях, зависит от многих факторов, включая человеческий фактор, состояние оборудования, случайные и систематические погрешности, особенности отбора проб. Истинное фазовое состояние пробы, в случае если она является многокомпонентной и её составляющие обладают разными физико-химическими свойствами, нарушается в ходе операций по отбору проб и их доставки в лабораторию. Нарушение истинного фазового состояния может привести либо к некорректным выводам о качестве того или иного компонента технологического процесса, либо к ведению процесса с большим запасом по качеству. Что касается временного фактора, то способ лабораторного химического анализа не обеспечивает мгновенного получения данных о качестве продукта из-за длительных и трудоемких отборов, транспортировки и анализа производимых проб, что приводит к большому запаздыванию при управлении по качеству. Вместе с тем следует отметить, что лабораторный анализ может обеспечить наиболее глубокое изучение свойств как выходного продукта, так и компонентов технологического процесса, поэтому его применение сегодня также оправданно, но уже в меньшей степени для непрерывного управления качеством.

Иная ситуация складывается в сфере применения поточных анализаторов. На сегодняшний день ведутся работы по совершенствованию конструкций поточных анализаторов для обеспечения непрерывного мониторинга качества компонентов технологического процесса.

Важнейшим преимуществом поточных анализаторов является возможность осуществления постоянного контроля качества того или иного компонента. Таким образом, существенно ускоряются процедуры принятия решений в случае отклонения от оптимальных параметров, снижается запаздывание, характерное для лабораторных химических анализов. Вместе с тем поточные анализаторы обладают недостатками, касающимися достоверности данных, получаемых в режиме реального времени. Существующие конструкции поточных анализаторов не позволяют достичь требуемой высокой точности измерений качества компонентов технологического процесса, а также требуют постоянной калибровки. Кроме того, они обладают высокой стоимостью и требуют дорогостоящего эксплуатационного обслуживания [2].

Перспективным способом определения качества является применение виртуальных анализаторов. Принцип работы виртуальных анализаторов заключается в непрерывном анализе требуемого показателя качества по математической модели, которая описывает функциональную зависимость с текущими значениями измеряемых технологических переменных. Таким образом, виртуальный анализатор позволяет оценивать не само качество компонентов технологического процесса, а связывает необходимые показатели качества продукта с такими измеряемыми параметрами технологического процесса, как температура, давление, расход, непрерывно контролируемые современными системами управления [3].

Виртуальный анализатор является инструментом повышения уровня информационно-аналитического обеспечения технологического персонала и создания условий (достаточной информационной базы) для формирования оптимального управления [4]. При этом виртуальный анализатор позволяет изменить подход к управлению качеством компонентов технологического процесса, сделав его универсальным. Корректно составленная математическая модель для любого компонента технологического процесса позволит производить контроль его качества без проведения технического перевооружения и установки поточных анализаторов другого типа.

Таким образом, рассматриваемая в работе задача поддержания качества целевого продукта с помощью виртуального анализатора является актуальной и выполнена в соответствии с современными тенденциями развития систем управления технологическими процессами.

## **2. Корреляционный анализ технологических параметров**

Светлые нефтепродукты (бензин, керосин, дизельное топливо и др.) являются наиболее маржинальными продуктами нефтепереработки. Наиболее легким светлым нефтепродуктом из получаемых в ходе процесса ректификации является бензиновая фракция. Таким образом, целевым продуктом процесса ректификации является бензиновая фракция, отбираемая с верха колонны.

Основным показателем процесса ректификации является четкость разделения, характеризующая чистотой отбираемых продуктов, т.е. долей компонентов, выкипающих по кривой ИТК до заданной температурной границы деления смеси в отобранных фракциях. Четкость разделения оценивается косвенным показателем – налеганием температур кипения соседних фракций.

Для обеспечения четкости разделения фракций необходимо контролировать температуру конца кипения целевого продукта, чтобы минимизировать налегание на температуру начала кипения бокового погона.

Для проведения расчетов по созданию математической модели конца кипения бензиновой фракции были получены статистические данные параметров технологического процесса, предположительно имеющих влияние на показатель качества, а также лабораторные данные по качеству целевого продукта.

Для технологических параметров вводятся обозначения: качество целевого продукта – температура конца кипения бензиновой фракции (Q); температура верха колонны (TE3-3); давление в колонне (PT4); температура в средней части колонны (TE3-2); температура в кубе колонны (TE3-1); уровень в кубе колонны (LT2-1); расход широкой фракции углеводородов (FRC35). Вариация изучаемого признака находится в тесной связи и взаимодействии с вариацией других признаков, характеризующих исследуемую совокупность единиц [5–9].

Для определения тесноты связи между показателем качества и параметрами колонн проведен корреляционный анализ [10].

Коэффициент корреляции Пирсона является количественной мерой силы и направления линейной взаимосвязи между двумя выборками [11] и рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции между выборками  $x$  и  $y$ ;  $n$  – размерность выборки;  $i$  – номер временного среза;  $x_i$  – значения первой выборки;  $\bar{x}$  – среднее значение первого параметра;  $y_i$  – значения второй выборки;  $\bar{y}$  – среднее значение второго параметра.

Коэффициент корреляции может принимать значения в промежутке от минус одного до плюс одного и является безразмерной величиной. Положительное значение коэффициента корреляции свидетельствует о прямой зависимости между рассматриваемыми величинами, отрицательное значение – об обратной связи. Чем ближе значение коэффициента корреляции к крайним точкам (плюс и минус один), тем больше степень линейной связи [12–14].

Коэффициенты парной корреляции между температурой конца кипения целевого продукта и технологическими параметрами рассчитываются в программе Excel по формуле (1).

Для интерпретации силы корреляционной зависимости используется шкала Чеддока, представленная в табл. 1.

Для создания математической модели показателя качества отбираются технологические параметры, имеющие, как минимум, умеренную связь по шкале Чеддока, т.е. имеющие коэффициент корреляции по модулю 0,3 и более.

Таблица 1

Анализ силы связи между переменными

Качественная характеристика силы связи	Величина коэффициента корреляции по модулю
Слабая	От 0,1 до 0,3
Умеренная	От 0,3 до 0,5
Заметная	От 0,5 до 0,7
Высокая	От 0,7 до 0,9
Весьма высокая	От 0,9 до 1

Таковыми являются температура верха колонны (ТЕЗ-3), давление в колонне (РТ4), температура в средней части колонны (ТЕЗ-2) и уровень в кубе колонны (LT2-1). Таким образом, показатель качества является функцией от данных параметров.

Наличие мультиколлинеарности может приводить к неустойчивости оценки связи параметров [15, 16]. Показатель качества необходимо представить в виде функции от слабо коррелируемых между со-

бой параметров. Для этого определяются коэффициенты корреляции технологических параметров между собой.

Аналогично отбираются технологические параметры, имеющие, как минимум, умеренную связь по шкале Чеддока. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Взаимосвязь между параметрами технологического процесса**

Первый параметр	Второй параметр	Величина коэффициента корреляции	Интерпретация взаимосвязи
ТЕЗ-3	РТ4	-0,0968	Несущественная
ТЕЗ-3	ТЕЗ-2	0,5568	Существенная
ТЕЗ-3	LT2-1	-0,0852	Несущественная
РТ4	ТЕЗ-2	0,0664	Несущественная
РТ4	LT2-1	-0,0039	Несущественная
ТЕЗ-2	LT2-1	-0,1484	Несущественная

Между температурой верха колонны и температурой в средней части колонны имеется высокая корреляция. Данные параметры нельзя использовать в одной математической модели. Поэтому будут разработаны две модели:

$$Q_{\phi 1} = f(TEZ - 3, PT4, LT2 - 1), \quad (2)$$

$$Q_{\phi 2} = f(TEZ - 2, PT4, LT2 - 1). \quad (3)$$

**3. Регрессионный анализ технологических параметров**

Корреляционный анализ является подготовительным этапом перед проведением регрессионного анализа. Оба метода изучают взаимосвязь между статистическими данными. В корреляционном анализе исследуются сила связи и ее направление (обратная связь или прямая связь) между параметрами. В регрессионном анализе исследуется форма зависимости, которая отображается в виде уравнения регрессии, в котором зависимая (результатирующая) переменная выражается через независимые факторы (предикторы) [17],

$$y(x_1, x_2, \dots, x_m) = a + k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_mx_m, \quad (4)$$

где  $y$  – зависимая переменная;  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – независимые переменные;  $m$  – количество независимых переменных;  $a$  – свободный член уравнения;  $k_1, k_2, \dots, k_m$  – коэффициенты регрессии.

Для разработки линейных уравнений регрессии для полученных функций показателя качества необходимо исходные данные разделить на две выборки: тестовую и обучающую.

С помощью обучающей выборки будут разрабатываться уравнения регрессии. Тестовая выборка служит для оценки точности полученных моделей. Как правило, тестовая выборка составляет не более 25 % от всего объема исходных данных [18].

Для разделения исходных данных на две выборки отберем каждое пятое значение в качестве тестовой выборки, обеспечив таким образом 20 % объема данных.

Для получения регрессионных уравнений необходимо определить коэффициенты регрессии. Для нахождения коэффициентов используется метод Бокса–Бенкена. Расчет состоит из нахождения матрицы  $A$ , вектора  $B$  и решения матричного уравнения.

Матрица  $A$  определяется с помощью независимых переменных:

$$A = \{a_{ij}\}, a_{ij} = \sum_{k=1}^m x_{ik} \cdot x_{jk}, \quad (5)$$

где  $a_{ij}$  – коэффициент полинома,  $x_{ik}$  – значение  $i$ -го независимого параметра из  $k$ -й строки,  $m$  – количество строк.

Вектор  $B$  определяется с помощью зависимой величины и независимых переменных:

$$B = \{b_i\}, b_i = \sum_{k=1}^m x_{ik} Y_k, \quad (6)$$

где  $x_{ik}$  – значение  $i$ -го независимого параметра из  $k$ -й строки,  $y_k$  – значение зависимой величины, соответствующей  $x_{ik}$ .

Из решения матричного уравнения можно получить коэффициенты регрессии:

$$A \times K = B, \quad (7)$$

где  $K$  – вектор коэффициентов полинома,  $K = \{k_i\}$ .

Таким образом, получены две регрессионные модели расчета конца кипения бензиновой фракции:

$$Q_1 = 0,24102 \cdot TE3 - 3 + 0,00111 \cdot PT4 + \\ + 0,37578 \cdot LT2 - 1 + +98,00422, \quad (8)$$

где  $Q_1$  – первая регрессионная модель качества,

$$Q_2 = 0,00089 \cdot PT4 + 0,14947 \cdot TE3 - 2 + \\ + 0,39981 \cdot LT2 - 1 + +99,64804, \quad (9)$$

где  $Q_2$  – вторая регрессионная модель качества.



Полученные математические модели показателя качества оцениваются с помощью отобранной ранее тестовой выборки. Рассчитываются значения показателя качества и сравниваются с истинным значением. Оценка точности проводится с помощью максимальной относительной ошибки [19]:

$$\delta_Q = \frac{Q_M - Q_{\text{ист}}}{Q_{\text{ист}}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где  $\delta_Q$  – относительная ошибка модели, %,  $Q_M$  – значение, полученное по модели,  $Q_{\text{ист}}$  – истинное значение.

Максимальная относительная ошибка по тестовой выборке для первой модели равна 0,617 %, для второй – 0,705 %. Чем меньше данная ошибка, тем более точной является математическая модель. Наименьшей ошибкой обладает первая модель показателя качества, она будет использоваться для дальнейших расчетов.

#### **4. Построение автоматической системы регулирования по качеству**

Для построения автоматической системы регулирования (АСР) по качеству должна быть построена функциональная схема автоматизации. Виртуальный анализатор качества позволяет получать достоверные данные в режиме реального времени, которые можно использовать при построении АСР.

Данные о технологических параметрах, входящих в математическую модель качества, передаются виртуальному анализатору, который рассчитывает значение показателя качества. Далее происходит сравнение полученного значения с заданным значением ( $V_{\text{зад}}$ ). В случае наличия ошибки производится коррекция задания для локального регулятора АСР ( $U$ ).

Описываемая структура АСР с виртуальным анализатором представлена на рис. 1. Она является общей для подобных систем [20–25].

В полученной модели показателя качества изменяемым параметром примем уровень в кубе колонны, который можно регулировать процентом открытия регулирующего клапана LV-503. Остальные параметры, входящие в модель показателя качества, остаются неизменными, что было выяснено в ходе проведения корреляционного анализа технологических параметров.

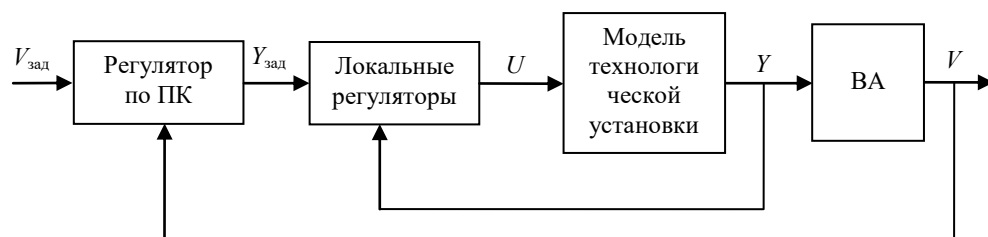


Рис. 1. Общая структура АСР с виртуальным анализатором:  $V_{\text{зад}}$  – вектор заданных значений показателей качества;  $V$  – вектор показателя качества, рассчитанного по виртуальному анализатору;  $Y$  – вектор контролируемых технологических параметров;  $Y_{\text{зад}}$  – вектор из заданных значений;  $U$  – вектор управляющих воздействий

Для построения АСР используется программа Vissim 6.0. Виртуальный анализатор показателя качества, построенный в данной программе, представлен на рис. 2.

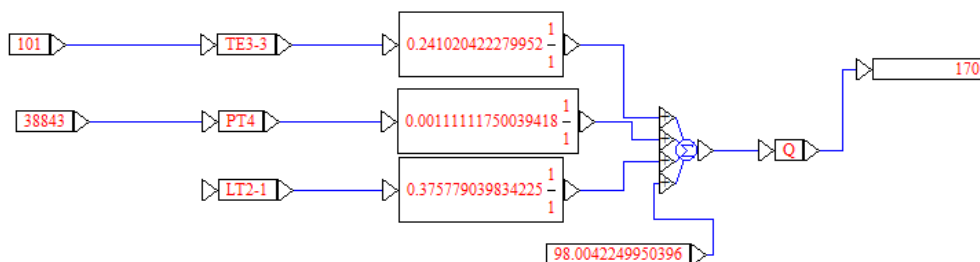


Рис. 2. Виртуальный анализатор показателя качества, построенный в программе Vissim 6.0

Значение температуры конца кипения бензиновой фракции, рассчитанное по математической модели виртуальным анализатором, связывается с регулятором по показателю качества. Выход этого регулятора соединяется каскадно (является корректирующим контуром) с регулированием уровня в кубе колонны и будет являться заданием для регулятора, управляющего регулирующим клапаном LV-503. Но при этом управляющее воздействие с регулятора по показателю качества является заданием для регулятора клапана LV-503. Таким образом, регулятор, управляющий регулирующим клапаном LV-503, является внутренним контуром, а регулятор по показателю качества – внешним. Схема регулирования аналогично выполнена в программе Vissim 6.0 и приведена на рис. 3.

Для определения оптимальных настроек регулятора по показателю качества используются встроенные функции Vissim 6.0.

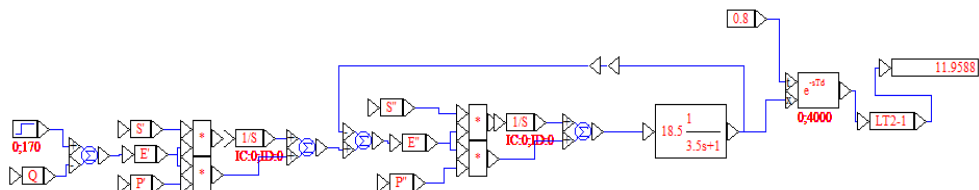


Рис. 3. Реализация схемы регулирования по показателю качества

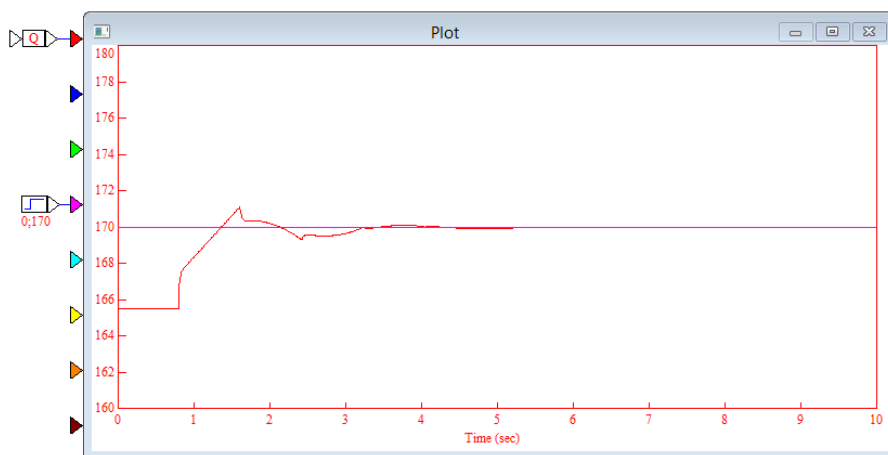


Рис. 4. График регулирования температуры конца кипения бензиновой фракции

В итоге получен следующий график регулирования температуры конца кипения бензиновой фракции, представленный на рис. 4. Температура конца кипения бензиновой фракции достигла задания и удерживается на этом уровне.

### Заключение

Представлена разработка математической модели автоматизированной системы управления процессом атмосферной перегонки товарной нефти. Произведен расчет системы регулирования температурой и давлением куба колонны. Показаны основные характеристики процесса, определены показатели качества товарной нефти. Данная система предназначена для поддержания заданной производительности производства.

Эффективность проекта определяется тем, что осуществляется контроль качества получаемых продуктов на всех этапах технологического процесса, что увеличит четкость ректификации.

В работе поставлена задача обеспечения поддержания качества целевого продукта с помощью виртуального анализатора. Разработан-

ная система может применяться в системах управления переработкой сырья на предприятиях по производству товарной нефти с использованием атмосферной перегонки.

### **Библиографический список**

1. Гурьева Е.М., Кольцов А.Г. Применение виртуальных анализаторов для определения качества нефтепродуктов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – № 1. – С. 1–2.

2. Тугашева Л.Г. Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 3. – С. 98–99.

3. Исследование моделей виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса ректификации / Г.Б. Диго, Н.Б. Диго, И.С. Можаровский, А.Ю. Торгашов // Моделирование систем. – 2011. – № 4. – С. 384–387.

4. Мусаев А.А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. – 2003. – № 8. – С. 1–2.

5. Орлова И.В. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учеб. пособие. – М.: Вузовский учебник, 2007. – С. 170–207.

6. Khan R.M. Problem solving and data analysis using minitab: a clear and easy guide to six sigma methodology. – Wiley, 2013. – P. 344–406.

7. Shultz D.S., Krainov A.Y. Mathematical modeling of SHS process in heterogeneous reactive powder mixtures // Computer Research and Modeling. – 2011. – Vol. 3. – P. 147–153.

8. Vasenin I.M., Krainov A.Y., Isaychenkov A.B. Mathematical modeling of drying of coal particles in the gas stream // Computer Research and Modeling. – 2012. – Vol. 4, no. 2. – P. 357–367.

9. Tokarev S.M. Mathematic modeling of thermal distillation of water in film flowing under vacuum // Computer Research and Modeling. – 2013. – Vol. 5, no. 2. – P. 205–211.

10. Shevlyakov G.L. Robust correlation: theory and applications. – 2016. – P. 10–32.

11. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для вузов. – 9-е изд. – М.: Высшая школа, 2004. – С. 190–206.

12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 9-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2003. – С. 176–184.

13. Lobasov A.S., Minakov A.V. Numerical simulation of heat and mass transfer processes in microchannels using CFD-package  $\sigma$ Flow // Computer Research and Modeling. – 2012. – Vol. 4, no. 4. – P. 781–792.

14. Koteleva N.I., Shablonsky I.E., Koshkin A.V. Computer training simulator for instruction of oil and gas technological processes operators: the analysis of existing decisions and the way of their improvement // Journal of mining institute. – 2011. – Vol. 192. – P. 212–215.

15. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. Multi-criteria optimization of the process of electrolytic alkali's evaporation in order to develop a resource-saving chemical-technological system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering chapter. – 2020. – 734(1). – P. 012121(1–5). DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012121

16. Шулаева Е.А., Павлов В.Б. Разработка метода многокритериальной оптимизации технологического процесса выпаривания электролитической щелочи с целью создания ресурсосберегающей химико-технологической системы // Естественные и технические науки. – 2019. – № 11(137). – С. 418–421.

17. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – С. 48–94.

18. Кафтаников И.Л., Парасич А.В. Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2016. – № 3. – С. 15–23.

19. Демиденко Е.З. Линейная и логическая регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1981. – С. 5–14.

20. Шулаева Е.А., Павлов В.Б. Разработка усовершенствованной системы управления технологическими процессами на основе нейросетевого моделирования с целью создания ресурсосберегающей химико-технологической системы // Естественные и технические науки. – 2019. – № 12(138). – С. 328–330.

21. Grudiaeve E.K., Dushin S.E., Kuz'min N.N. Dynamic models of controlled biochemical wastewater treatment processes // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 732–737. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-732-737

22. Grudiaeva E.K., Dushin S.E. Logical-dynamic control of biochemical processes of wastewater treatment // Известия высших учебных заведений. Технические науки. – 2015. – 7(168). – P. 208–219.

23. Smirnov N.V., Novikov P.I. Computer simulation of the process of bio-purification with a piecewise constant hourly flow of wastewater // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные, технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 134–149.

24. Shulaeva E.A., Pavlov V.B., Burdov A.E. Simulation of the fuel gas and raw material supply system to the furnace of the atmospheric oil distillation unit and development of a computer training software // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1679(1). – P. 022093(1–6). DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022093

25. Shulaeva E.A., Valitov D.R., Kubryak A.I. Simulation of the gas fractionating unit of depropanization system and development of a computer training software // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1691(1). – P. 012144 (1–7). DOI: 10.1088/1742-6596/1691/1/012144

## References

1. Gur'eva E.M., Kol'tsov A.G. Primenenie virtual'nykh analizatorov dlia opredeleniia kachestva nefteproduktov [Application of virtual analyzers to determine the quality of petroleum products]. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016, no. 1, pp. 1-2.

2. Tugasheva L.G. Virtual'nye analizatory pokazatelei kachestva protsessa rektifikatsii [Virtual analyzers of indicators of the quality of the rectification process]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*, 2013, no. 3, pp. 98-99.

3. Digo G.B., Digo N.B., Mozharovskii I.S., Torgashov A.Iu. Issledovanie modelei virtual'nykh analizatorov massoobmennogo tekhnologicheskogo protsessa rektifikatsii [Investigation of models of virtual analyzers of mass transfer technological process of rectification]. *Modelirovanie sistem*, 2011, no. 4, pp. 384-387.

4. Musaev A.A. Virtual'nye analizatory: kontseptsiiia postroeniia i primeneniia v zadachakh upravleniia nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami [Virtual analyzers: the concept of construction and application in the control of continuous technological processes]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2003, no. 8, pp. 1-2.

5. Orlova I.V. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli: komp'yuternoe modelirovanie [Economic and mathematical methods and models: computer modeling]. Moscow: Vuzovskii uchebnik, 2007, pp. 170-207.
6. Khan R.M. Problem solving and data analysis using minitab: a clear and easy guide to six sigma methodology, 2013, pp. 344-406.
7. Shultz D.S. and Krainov A.Y. Mathematical modeling of SHS process in heterogeneous reactive powder mixtures. *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 3, pp. 147-153.
8. Vasenin I.M., Krainov A.Y., Isaychenkov A.B. Mathematical modeling of drying of coal particles in the gas stream. *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 357-367.
9. Tokarev S.M. Mathematic modeling of thermal distillation of water in film flowing under vacuum. *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 205-211.
10. Shevlyakov G.L. Robust correlation: theory and applications, 2016, pp. 10-32.
11. Gmurman V.E. Rukovodstvo k resheniiu zadach po teorii veroiatnostei i matematicheskoi statistike [A Guide to Problem Solving in Probability Theory and Mathematical Statistics]. 9nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2004, pp. 190-206.
12. Gmurman V.E. Teoriia veroiatnostei i matematicheskaiia statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. 9nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2003, pp. 176-184.
13. Lobasov A.S., Minakov A.V. Numerical simulation of heat and mass transfer processes in microchannels using CFD-package  $\sigma$ Flow. *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 781-792.
14. Koteleva N.I., Shablonsky I.E., Koshkin A.V. Computer training simulator for instruction of oil and gas technological processes operators: the analysis of existing decisions and the way of their improvement. *Journal of mining institute*, 2011, vol. 192, pp. 212-215.
15. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. Multi-criteria optimization of the process of electrolytic alkali's evaporation in order to develop a resource-saving chemical-technological system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering chapter*, 2020, 734(1), 012121(1-5) p. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012121
16. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. Razrabotka metoda mnogokriterial'noi optimizatsii tekhnologicheskogo protsessa vyparivaniia elektroliticheskoi

shchelochi s tsel'iu sozdaniia resursoberegaiushchei khimiko-tekhnologicheskoi sistemy [Development of a method for multicriteria optimization of the technological process of evaporation of electrolytic alkali in order to create a resource-saving chemical-technological system]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 11(137), pp. 418-421.

17. Seber Dzh. Lineinyi regressionnyi analiz [Linear Regression Analysis]. Moscow: Mir, 1980, pp. 48-94.

18. Kaftannikov I.L., Parasich A.V. Problemy formirovaniia obuchaiushchei vyborke v zadachakh mashinnogo obucheniia [Problems of forming a training sample in machine learning problems]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Komp'iuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2016, no. 3, pp. 15-23.

19. Demidenko E.Z. Lineinaia i lineinaia regressiia [Linear and Linear Regression]. Moscow: Finansy i statistika, 1981, pp. 5-14.

20. Shulaeva E.A., Pavlov V.B. Razrabotka usovershenstvovannoi sistemy upravleniia tekhnologicheskimi protsessami na osnove neirosetevogo modelirovaniia s tsel'iu sozdaniia resursoberegaiushchei khimiko-tekhnologicheskoi sistemy [Development of an advanced process control system based on neural network modeling in order to create a resource-saving chemical-technological system]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 12(138), pp. 328-330.

21. Grudiaeva E.K., Dushin S.E., Kuz'min N.N. Dynamic models of controlled biochemical wastewater treatment processes. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 732-737. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-732-737

22. Grudiaeva E.K., Dushin S.E. Logical-dynamic control of biochemical processes of wastewater treatment. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnicheskie nauki*, 2015, 7(168), pp. 208-219.

23. Smirnov N.V., Novikov P.I. Computer simulation of the process of bio-purification with a piecewise constant hourly flow of wastewater. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye, tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 24, pp. 134-149.

24. Shulaeva E.A., Pavlov V.B., Burdov A.E. Simulation of the fuel gas and raw material supply system to the furnace of the atmospheric oil distillation unit and development of a computer training software. *Journal of*



*Physics: Conference Series*, 2020, 1679(1), 022093(1-6) p. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022093

25. Shulaeva E.A., Valitov D.R., Kubryak A.I. Simulation of the gas fractionating unit of depropanization system and development of a computer training software. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1691(1), 012144 (1–7) p. DOI: 10.1088/1742-6596/1691/1/012144

### **Сведения об авторах**

**Шулаева Екатерина Анатольевна** (Стерлитамак, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в Стерлитамаке (453118, Республика Башкортостан, Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: eshulaeva@mail.ru).

**Павлов Владимир Борисович** (Стерлитамак, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в Стерлитамаке (453118, Республика Башкортостан, Стерлитамак, пр. Октября, 2, e-mail: vb\_pavlov@mail.ru).

### **About the author**

**Ekaterina A. Shulaeva** (Sterlitamak, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Automated Technology and Information Systems Branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak (453118, Bashkortostan Republic, Sterlitamak, 2, Oktyabrya ave., e-mail: eshulaeva@mail.ru).

**Vladimir B. Pavlov** (Sterlitamak, Russian Federation) – Ph. D. in Physics and Mathematics, Associate Professor Department of Equipment for Petrochemical Plants Branch of the Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak (453118, Bashkortostan Republic, Sterlitamak, 2, Oktyabrya ave., e-mail: vb\_pavlov@mail.ru).

Получено 24.11.2021