

Многомерный корреляционно-регрессионный анализ химических показателей топлива

Д. И. Демченко¹, И. М. Новожилов^{2✉}

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию способов применения методов системного анализа для анализа физико-химического состава топлива, производимого смешением нескольких компонентов в соответствующих пропорциях. В рамках решения поставленной задачи был проведен отбор наиболее влияющих факторов методом корреляционно-регрессионного анализа. Для обеспечения математического решения поставленной задачи в рамках программы использовался метод последовательного квадратичного программирования (SLSQP), реализованный в методе «minimize» библиотеки SciPy для языка программирования Python. В статье приводятся результаты разработки приложения для расчета пропорций смешения топлива с заданными характеристиками, позволяющего оптимизировать указанный процесс.

Ключевые слова: информационные технологии, системный анализ, нефтепереработка, корреляционно-регрессионный анализ, нелинейное программирование, Python

Для цитирования: Демченко Д. И., Новожилов И. М. Многомерный корреляционно-регрессионный анализ химических показателей топлива // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 53–60. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-53-60.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Multidimensional Correlation-Regression Analysis of Fuel Chemical Properties

D. I. Demchenko¹, I. M. Novozhilov^{2✉}

¹ Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. This article is dedicated to exploring methods of applying systems analysis for evaluating the physicochemical composition of fuel produced by mixing several components in appropriate proportions. As part of addressing the problem, a selection of the most influential factors was conducted using correlation-regression analysis. To ensure a mathematical solution to the problem within the program, the Sequential Least Squares Programming (SLSQP) method was utilized, implemented in the «minimize» method of the SciPy library for the Python programming language. The article presents the results of developing an application for calculating the mixing proportions of fuel with specified characteristics, allowing for the optimization of this process.

Keywords: IT, systems analysis, oil refining, correlation-regression analysis, nonlinear programming, Python

For citation: Demchenko D. I., Novozhilov I. M. Multidimensional Correlation-Regression Analysis of Fuel Chemical Properties // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 53–60. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-53-60.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Для топливно-энергетического комплекса Российской Федерации основными видами продукции, получаемыми в ходе нефтепереработки, остаются дизельное топливо и бензины. Восстребованность улучшения технологических процессов в данной отрасли, в том числе с помощью оптимизации, обуславливается как необходимостью поддержания конкурентоспособности, так и внешнеполитическими обстоятельствами. В условиях дороговизны компонентов, необходимых для производства топлива, появляется и необходимость улучшения процесса смешения путем оптимизации рецептур и их создания.

К лидирующим способам оптимизации технологических процессов относится цифровизация. В условиях процесса создания рецептур она подразумевает переход от многочисленных и дорогостоящих лабораторных опытов к использованию современного вычислительного программного обеспечения. Его разработка и совершенствование остаются актуальной задачей, способствующей развитию как нефтеперерабатывающей отрасли, так и цифрового сектора. Так, например, в [1] А. В. Мартиросян и соавторы разработали концептуальную модель нефтяного месторождения, способную отражать и прогнозировать изменения в резервуаре при изменении параметров режима его эксплуатации. В [2], [3] Ю. В. Ильюшиным, А. М. Еремеевой и соавторами изучались способы повышения эффективности процесса сушки зерна как составляющей технологического процесса производства биотоплива – одного из перспективных направлений научных исследований в области нефтепереработки [4].

Постановка задачи. Одну из основных проблем технологического процесса товарного смешения бензинов представляет очень дорогостоящий этап разработки непосредственных рецептур смешения, заключающийся в последовательном проведении многих лабораторных опытов с использованием компонентов бензина, направленных на подбор оптимальной пропорции, при которой получаемое топливо будет соответствовать всем техническим и экологическим ограничениям, накладываемым на него нормативными документами. Этот процесс требует увеличения трудозатрат лаборантов, а также расхода ценных компонентов.

Решением данной проблемы станет специализированное программное обеспечение, приложение, реализующее возможность автоматического вычисления рецептуры топлива с заданными характеристиками из-за данных компонентов. Подобное приложение под названием «Compounding» было разработано в Томском политехническом университете [5], однако по неизвестным причинам оно не получило широкого распространения в промышленности и научной литературе, что говорит о необходимости продолжения развития в данном направлении.

Отбор наиболее влиятельных факторов. Чтобы оптимизировать процесс смешивания автомобильных бензинов, необходимо определить, какие из их составляющих более всего влияют на целевой признак – октановое число конечной смеси. Для оценки и отбора компонентов было решено воспользоваться методом корреляционно-регрессионного анализа.

Многомерная регрессия – это метод, используемый для измерения степени, в которой различные независимые и зависимые переменные линейно связаны друг с другом. Это соотношение линейно из-за корреляции между переменными. Корреляционный анализ оценивает тесноту и направление линейных зависимостей между переменными. Как только связь установлена, с помощью данного анализа может быть создана модель, которая позволяет использовать объясняющую переменную для прогнозирования переменной результата, т. е. статистический метод, известный как простая линейная регрессия, с помощью которой также устанавливается причинно-следственная связь.

Множественная корреляция исследует корреляцию между переменной результата и совокупным эффектом других факторов. В то время как многомерная регрессия используется в качестве контролируемого алгоритма в машинном обучении, модели для прогнозирования поведения переменной отклика на основе соответствующих ей переменных-предикторов.

Так, точность и эффективность многомерной регрессионной оценки также отмечена в [6], где

была разработана версия прогнозирования месячного дохода от электроэнергии с учетом таких факторов, как температура, денежный бум, замещение энергии и расширение бизнеса. В исследовании [7] был применен подход многомерной регрессионной оценки для изучения объема доходов от продажи поддержанных автомобилей в Индонезии и определения влияния различных факторов на этот показатель.

Для оптимального выбора наиболее влияющих компонентов, обратимся к тестовой выборке, представленной в табл. 1: 10 рецептов автомобильного топлива, содержащих в себе 5 компо-

нентов. Целевым признаком для отслеживания качества смеси будем считать октановое число смеси (ОЧИ), определенное по исследовательскому методу, – меру детонационной стойкости топлива, за эталон которой взята смесь изооктана и н-гептана. Октановое число соответствует содержанию (в процентах от объема) изооктана в эталонной смеси (т. е. топливо с октановым числом 95 имеет такую же детонационную стойкость, как и смесь с содержанием изооктана 95 %).

Целью исследования на данном этапе служит построение уравнения регрессии и изучение его коэффициентов. Для построения модели исполь-

Табл. 1. Тестовая выборка рецептов

Tab. 1. Test samples of formulations

Рецептура	Компонент автомобильного топлива, %					ОЧИ
	Каталитический крекинг	Риформат	Изомеризат	Алкилат	Фракция 62–85	
1	55	23	18	2	2	93.38
2	49	23	14	7	7	91.74
3	39	15	12	23	8	87.70
4	53	17	12	9	9	90.60
5	50	22	14	8	6	91.94
6	44	22	9	9	16	88.87
7	49	28	17	3	3	93.45
8	53	24	19	2	2	93.47
9	48	22	10	10	10	90.66
10	45	23	4	19	9	88.00

Табл. 2. Регрессионная статистика

Tab. 2. Regression statistics

Параметр	Результат
Множественный R	1
R -квадрат	1
Нормированный R -квадрат	1
Стандартная ошибка	2.69E–15
Наблюдения	10

Табл. 3. Показатели дисперсионного анализа

Tab. 3. Indicators of variance analysis

Показатель	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	5	43.90	8.78	1.21E+30	1.91E–60
Остаток	4	2.90E–29	7.25E–30	–	–
Итого	9	43.90	–	–	–

Табл. 4. Коэффициенты дисперсионного анализа

Tab. 4. Coefficients of variance analysis

Коэффициенты		Стандартная ошибка	t -статистика	Р-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Переменная	Значение					
y	–3.12E–13	3.45E–13	–9.05E–01	4.17E–01	–1.27E–12	6.45E–13
x_1	0.92	3.28E–15	2.81E+14	9.64E–58	9.20E–01	9.20E–01
x_2	1.00	3.46E–15	2.89E+14	8.61E–58	1.00E+00	1.00E+00
x_3	0.93	3.94E–15	2.36E+14	1.92E–57	9.30E–01	9.30E–01
x_4	0.62	3.51E–15	1.76E+14	6.20E–57	6.20E–01	6.20E–01
x_5	0.90	3.94E–15	2.28E+14	2.21E–57	9.00E–01	9.00E–01

зуется метод наименьших квадратов, как наиболее эффективный метод оценки линейных несмещенных моделей.

Используются следующие математические представления наблюдений:

- y – октановое число;
- x_1 – каталитический крекинг;
- x_2 – риформат;
- x_3 – изомеризат (пентанов и гексанов);
- x_4 – алкилат;
- x_5 – фракция 62–85.

Для выполнения поставленной задачи воспользуемся Microsoft Excel. С помощью встроенного пакета «Анализ данных» определим необходимые параметры с помощью функции «Регрессия». Полученные в результате работы функции коэффициенты представим в виде табл. 2–4, где в табл. 3:

- df – количество степеней свободы;
- SS – сумма квадратов;
- MS – среднеквадратичная ошибка.

Столбец «Коэффициенты» (табл. 4) содержит показатели линейной зависимости целевого параметра (ОЧИ) от x_i , составить уравнение множественной регрессии:

$$y = 0.92x_1 + x_2 + 0.93x_3 + 0.62x_4 + 0.9x_5. \quad (1)$$

Уравнение (1) отражает общую тенденцию зависимости октанового числа топливной смеси от составляющих ее компонентов. Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициенты уравнения – это не что иное, как значения октанового числа каждого из компонентов.

Для доказательства того, что факторы выбраны не случайно, рассмотрим t -критерий Стьюдента (столбец « t -статистика» табл. 4). Табличное значение при 10 наблюдениях и уровне значимости 0.05 равно 2.22 [8]. В табл. 4 все значения t -статистики переменных значительно превышают это значение (столбец « t -статистика»), что говорит о наличии тренда.

Также наличие зависимости можно оценить по столбцу «Р-значение» табл. 4. Р-значение – это

вероятность истинности нулевой гипотезы, которая гласит, что независимые переменные (переменные x_i в табл. 4) не объясняют динамику зависимой переменной y . Значения столбца «Р-значение» в табл. 4 меньше 0.5 для всех значений x , что означает, что выявленная закономерность неслучайна.

Столбцы «Нижние 95 %» и «Верхние 95 %» представляют собой границы доверительных интервалов, в которых лежат предполагаемые значения коэффициентов с вероятностью в 95 %.

Для оценки надежности уравнения регрессии используем F -критерий Фишера (табл. 3, столбец « F »). Табличное значение при 10 наблюдениях и 4 факторах равно 5.19 [9], значение же в табл. 3 выше его на порядок, следовательно, уравнение статистически значимо.

Для непосредственного отбора факторов проведем корреляционный анализ и оценим тесноту их связи. Воспользуемся для этого коэффициентом парной корреляции, вычисляемым с помощью базовой функции =КОРРЕЛ().

Представим значения парных корреляций в табл. 5.

Из таблицы видно, что наиболее влиятельные факторы по отношению к октановому числу – изомеризат, крекинг, а также фракция 62–85. В целом, общие значения позволяют судить не только о сильной связи между октановым числом и компонентами, но и о наличии среди них мультиколлинеарности. Наличие тесных связей между алкилатовым компонентом, а также риформатом и компонентом крекинга делают необходимым удаление ее из рассмотрения, равно как и компоненты фракции 62–85, так как она имеет меньшее влияние на октановое число, нежели тесно связанный с ней компонент изомеризата. Таким образом, для дальнейшего рассмотрения и изучения были отобраны 3 из 5 компонентов: каталитического крекинга, изомеризации пентано-гексановой фракции и риформат. Их влияние на октановое число было признано значительным, а также

Табл. 5. Матрица парных корреляций
Tab. 5. Matrix of pairwise correlations

	ОЧИ	Крекинг	Риформат	Изомеризат	Фракция 62–85	Алкилат
ОЧИ	1	0.829886	0.625959465	0.865776717	–0.84012842	–0.81275
Крекинг	0.829886	1	0.38111556	0.605355127	–0.579948258	–0.82396
Риформат	0.625959	0.381116	1	0.303762693	–0.231815651	–0.80391
Изомеризат	0.865777	0.605355	0.303762693	1	–0.971504104	–0.49074
Фракция 62–85	–0.84013	–0.57995	–0.231815651	–0.971504104	1	0.392235
Алкилат	–0.81275	–0.82396	–0.803907614	–0.490737263	0.392234882	1

были определены значения собственных октановых чисел этих компонентов.

Моделирование процесса и разработка приложения. Рассмотрим в качестве примера для разработки программы следующую задачу: необходимо получить топливную смесь с октановым числом 95, используя при этом 3 отобранных компонента, а также учитывая экологические ограничения, накладываемые на топливную смесь АИ-95 ГОСТом 32513–2013, а именно иметь:

- содержание ароматических углеводородов в конечной смеси меньше 35 %;
- содержание олефиновых углеводородов в конечной смеси меньше 18 %;
- октановое число по исследовательскому методу не менее чем 95.

Целевой функцией данной задачи служит *функция октанового числа*, ограничениями же будут уравнения, связывающие итоговую пропорцию с концентрацией в конечной смеси ароматических и олефиновых углеводородов, а также технические ограничения, накладываемые программой.

Для составления системы неравенств условий и ограничений необходимо разрешить вопрос с определением концентраций веществ, фигурирующих в экологических нормативах. Для этого на основании эмпирических данных смоделируем химический состав каждого из трех компонентов. Результат представим в табл. 6.

Табл. 6. Результат моделирования состава компонент
Tab. 6. Result of component composition modeling

Углеводород	Концентрация %	ОЧИ
<i>Каталитический риформинг</i>		
Изоалканы	28.73	102
Н-алканы	3.04	40
Алкены	0.23	90
Цикланы	2.00	77
Арены	66.00	103
<i>Каталитический крекинг</i>		
Изоалканы	26.82	102
Н-алканы	8.50	40
Алкены	41.55	90
Цикланы	5.00	77
Арены	18.13	103
<i>Каталитическая изомеризация</i>		
Изопентан	34.5750	92.3
Пентан	2.9250	61.0
2,2-диметилбутан	10.2832	91.8
2,3-диметилбутан	41.7008	101.7
Метилпентаны	2.1988	80.0
Гексан	2.0172	25.0
Метилциклопентан	3.7960	91.3
Циклогексан	2.5040	83.0

У каждого вещества, входящего в состав того или иного компонента, имеются значения концентрации в компоненте, а также октанового числа. Как *арены* выделены вещества, относящиеся к классу ароматических углеводородов, *алкены* – олефиновых. Стоит также заметить о незначительном отличии ОЧИ компонентов от найденных при помощи регрессии – подобные погрешности нежелательны и могут быть губительны на производстве, однако их тоже стоит учитывать. Таким образом, итоговая система уравнений, формирующая задачу линейного программирования, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{100x_1 + 90x_2 + 93x_3}{(x_1 + x_2 + x_3)} = 95; \\ \frac{(0.66x_1 + 0.1813x_2)}{(x_1 + x_2 + x_3)} \leq 0.35; \\ \frac{(0.0023x_1 + 0.4155x_2)}{(x_1 + x_2 + x_3)} \leq 0.18. \end{cases} \quad (2)$$

Совершим преобразования:

$$\begin{cases} \frac{100x_1 + 90x_2 + 93x_3}{(x_1 + x_2 + x_3)} - 95 = 0; \\ \frac{(0.66x_1 + 0.1813x_2)}{(x_1 + x_2 + x_3)} - 0.35 \leq 0; \\ \frac{(0.0023x_1 + 0.4155x_2)}{(x_1 + x_2 + x_3)} - 0.18 \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, в текущих обстоятельствах, нам необходимо минимизировать разницу между функцией октанового числа и числом 95, соблюдая при этом ограничения, которые также можно представить в виде задач минимизации. Для решения системы (3) воспользуемся языком Python и библиотекой SciPy, содержащей в себе разнообразный математический аппарат. Для создания пользовательского интерфейса используем среду разработки Qt Designer. Она позволяет создавать простые и продвинутое пользовательские интерфейсы при помощи модулей, собирающихся подобно конструктору. Использование этой среды разработки намного ускоряет процесс, так как затем файл с пользовательским интерфейсом можно конвертировать в исходный код на языке Python.

Разрабатывая пользовательский интерфейс, следует учесть то, что задача может выполняться на различных конфигурациях установок – это означает, что их следует сделать настраиваемыми. Для отслеживания корректности вводимых дан-

VKR

Компоненты

Риформат

изоалканы	28,73	%
н-алканы	3,04	%
алкены	2,00	%
цикланы	0,23	%
арены	66,00	%

Бензин каталитического крекинга

изоалканы	26,87	%
н-алканы	8,50	%
алкены	41,50	%
цикланы	5,00	%
арены	18,13	%

Бензин каталитической изомеризации пентанов и гексанов

изопентан	34,58	%
пентан	2,92	%
2,2 - диметилбутан	10,28	%
2,3 - диметилбутан	41,81	%
метилпентаны	2,10	%
гексан	2,01	%
метилциклопентан	3,80	%
циклогексан	2,50	%

Параметры

Октановое число конечной смеси: 95,00

Ароматические углеводороды ≤: 35,00 %

Олефиновые углеводороды ≤: 18,00 %

Состояние

Компоненты корректны.

Результаты

Требуемая пропорция

Риформат: 1,47

Бенз. кат. крекин: 1,48

Бенз. кат. изомеризации: 0,69

Расчет

Скан работы программы, имитирующей процесс смешивания
A screenshot of a program simulating the compounding process

ных добавим строку «Состояние» – здесь пользователь сможет увидеть, корректны ли введенные им данные, и если нет, то в каком конкретно компоненте находится ошибка. Система обработки ошибок работает следующим образом: как только пользователь нажимает кнопку «Расчет», программа суммирует значения концентраций в каждом компоненте. Если все суммы равны 100 с точностью до сотых (техническое ограничение, накладываемое программой), то в строку состояния будет выведено сообщение о корректности введенных данных, а в случае ошибки – номера компонентов, в которых присутствуют ошибки. Если номер выводится без знака, это означает, что сумма концентраций в компоненте превышает 100 %, в случае же недобора номер выводится со знаком минус.

Чтобы рассчитать необходимую пропорцию, пользователю необходимо ввести в соответствующие поля данные о химическом составе компонентов, учитывая, что сумма концентраций в каждом компоненте должна быть равна 100. Воспользовавшись встроенным обработчиком ошибок и удостоверившись, что введенные данные верны и адекватны, пользователю остается добавить ограничения в верхней правой части интерфейса и нажать на кнопку «Расчет», чтобы получить результат. Изображение пользовательского интерфейса и результата работы программы при заданных условиях представлено на рисунке.

Обсуждение результатов. Анализируя полученные в ходе разработки и реализации программы результаты, получаем, что для рассматриваемых в примере условий оптимальная пропорция

$x_1 : x_2 : x_3$ будет выглядеть как $1.47 : 1.48 : 0.69$ для риформата, бензина каталитического крекинга и изомеризата соответственно. Проверим результаты, подставив значения в (3):

$$\begin{cases} \frac{100 \cdot 1.47 + 90 \cdot 1.48 + 93 \cdot 0.69}{(1.47 + 1.48 + 0.69)} - 95 = 0; \\ \frac{(0.66 \cdot 1.47 + 0.1813 \cdot 1.48)}{(1.47 + 1.48 + 0.69)} - 0.35 \leq 0; \\ \frac{(0.0023 \cdot 1.47 + 0.4155 \cdot 1.48)}{(1.47 + 1.48 + 0.69)} - 0.18 \leq 0. \end{cases}$$

Совершим преобразования:

$$\begin{cases} 95.06 - 95 = 0.6; \\ 0.341 - 0.35 \leq 0; \\ 0.169 - 0.18 \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) адекватна и корректна, так как получившееся октановое число смеси на 0.6 п.

превышает требуемое и, таким образом, все рассмотренные необходимые условия и ограничения, были выполнены. Программа рассчитывает необходимую пропорцию компонентов с данными характеристиками с учетом экологических и технических ограничений, накладываемых ГОСТом 32513–2013 на топливо АИ–95.

Выводы. В данной статье представлены результаты разработки приложения, имеющего целью оптимизировать процесс товарного смешения топлива на этапе разработки рецептур смешивания. Анализ работы программы в текущем ее виде показал, что она справляется с реализацией вычисления рецептур, состоящих из трех компонентов с заданными характеристиками при наличии трех ограничений. Расширение количества участвующих компонентов, как и количество возможных ограничений и интегративных возможностей программы станет предметом дальнейших исследований и реализаций в рамках программы.

Список литературы

1. Development of an oil field's conceptual model graphical abstract / A. Martirosyan, Yu. V. Ilyushin, O. Afanaseva, T. Kukharova, M. M. Asadulagi, V. Khlopina // Intern. J. of Engin. 2025. Vol. 38(2). P. 381–388. doi: 10.5829/ije.2025.38.02b.12.
2. Ильюшин Ю. В., Еремеева А. М., Новожилов И. М. Повышение эффективности процесса сушки зерна за счет модернизации сушильных камер // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 3. С. 25–36. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-25-36.
3. Eremeeva A., Ilyushin Yu. V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. Art. 14956. doi: 10.1038/s41598-023-41962-0.
4. Yadykova A. Y., Ilyin S. O. Compatibility and rheology of bio-oil blends with light and heavy crude oils // Fuel. 2022. Vol. 314(12). Art. 122761. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122761.
5. Разработка интеллектуальной компьютерной системы для сопровождения производства моторных

топлив / М. В. Киргина, Б. В. Сахиевич, М. В. Майлин, Э. Д. Иванчина, Н. В. Чеканцев // Химия и хим. техн. 2014. Т. 57, № 11. С. 84–86.

6. Runshi L., Tzuying S., Tzuyun T. Investigation for smartfood's market ability based on regression analysis // Advances in Econ., Business and Management Research. 2021. Vol. 203. P. 1755–1761.

7. Puteri C. K., Safitri L. N. Analysis of linear regression on used car sales in Indonesia // J. of Phys.: Conf. Series. 2020. Vol. 1469, no. 1. Art. 012143.

8. Критические значения коэффициента Стьюдента (t -критерия) для различной доверительной вероятности α и числа степеней свободы f // Ин-т биотехнологии, пищевой и химической инженерии АлтГТУ. URL: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/t-statistic.html> (дата обращения: 10.06.2024).

9. Значения критерия Фишера (F -критерия) для уровня значимости $p = 0.05$ // Ин-т биотехнологии, пищевой и химической инженерии АлтГТУ. URL: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/F-statistic.html> (дата обращения: 10.06.2024).

Информация об авторах

Демченко Дмитрий Игоревич – студент группы СИСТ-24, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: rokkowg@gmail.com

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

References

1. Development of an oil field's conceptual model graphical abstract / A. Martirosyan, Yu. V. Ilyushin, O. Afanaseva, T. Kukharova, M. M. Asadulagi, V. Khlopina // Intern. J. of Engin. 2025. Vol. 38(2). P. 381–388. doi: 10.5829/ije.2025.38.02b.12.
2. Il'yushin Ju. V., Ereemeeva A. M., Novozhilov I. M. Povyshenie jeffektivnosti processa sushki zerna za schet modernizacii sushil'nyh kamer // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. T. 16, № 3. S. 25–36. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-3-25-36. (In Russ.).
3. Ereemeeva A., Ilyushin Yu. V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, no. 1. Art. 14956. doi: 10.1038/s41598-023-41962-0.
4. Yadykova A. Y., Ilyin S. O. Compatibility and rheology of bio-oil blends with light and heavy crude oils // Fuel. 2022. Vol. 314(12). Art. 122761. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122761.
5. Razrabotka intellektual'noj komp'yuternoj sistemy dlja soprovozhdenija proizvodstva motornyh topliv / M. V. Kirgina, B. V. Sahievich, M. V. Majlin, Je. D. Ivanchina, N. V. Chekan-cev // Himija i him. tehnol. 2014. T. 57, № 11. S. 84–86. (In Russ.).
6. Runshi L., Tzuying S., Tzuyun T. Investigation for smartfood's market ability based on regression analysis // Advances in Econ., Business and Management Research. 2021. Vol. 203. P. 1755–1761.
7. Puteri C. K., Safitri L. N. Analysis of linear regression on used car sales in Indonesia // J. of Phys.: Conf. Series. 2020. Vol. 1469, no. 1. Art. 012143.
8. Kriticheskie znachenija koeficienta St'judenta (t -kriterija) dlja razlichnoj doveritel'noj verojatnosti α i chisla stepenij svobody f // In-t biotehnologii, pishhevoj i himicheskoj inzhenerii AltGTU. URL: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/t-statistic.html> (data obrashhenija 10.06.2024). (In Russ.).
9. Znachenija kriterija Fishera (F -kriterija) dlja urovnja znachimosti $p = 0.05$ // In-t biotehnologii, pishhevoj i himicheskoj inzhenerii AltGTU. URL: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/F-statistic.html> (data obrashhenija: 10.06.2024). (In Russ.).

Information about the authors

Dmitry I. Demchenko – student of SIST-24 gr., Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.
E-mail: rokkowg@gmail.com

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Статья поступила в редакцию 10.02.2025; принята к публикации после рецензирования 04.04.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 10.02.2025; accepted 04.04.2025; published online 26.05.2025.
