

М.О. Балабекова*, А.Ж. Умбетов, Е.Е. Жанаділ, А.А. Ахылбеков

к.т.н., доцент, ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

магистр, ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

магистрант, ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

студент, ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: dadyiba@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО БЕНЗИНА

Аннотация

В статье представлен комплексный подход к анализу влияния технологических параметров на качественные характеристики бензина с применением современных статистических и математических методов. Особое внимание уделено построению прогностической модели октанового числа на основе температурного режима, давления и состава углеводородного сырья. Проведена многоуровневая обработка экспериментальных данных, включающая корреляционный анализ, метод главных компонент (РСА), кластеризацию методом k-средних и множественную регрессию. Установлены статистически значимые зависимости между параметрами режима и целевыми показателями качества топлива. Построенная регрессионная модель обладает высокой точностью, устойчивостью и прошла верификацию на независимой выборке. Также реализована визуализация поверхностей отклика (RSM), позволяющая определить критические и оптимальные зоны технологического процесса. Полученные результаты применимы для промышленного прогнозирования, цифровизации и внедрения в экспертные системы управления качеством моторных топлив в реальном времени.

Ключевые слова: бензин, корреляция, регрессия, кластеризация, модель, выборка, температура, давление, оптимизация, верификация.

Введение

В условиях растущей сложности нефтеперерабатывающих процессов и усиления требований к экологическим и эксплуатационным характеристикам моторных топлив возрастает необходимость в точных и надёжных методах оценки качества продукции. Одним из ключевых параметров, определяющих потребительскую ценность бензина, является октановое число (ОЧ), формирование которого зависит от множества взаимосвязанных факторов - как технологических, так и сырьевых. Классические подходы к контролю качества, основанные на лабораторных испытаниях, не обладают достаточной оперативностью и прогностической способностью [1]. В то же время, современные методы математического моделирования и интеллектуального анализа данных открывают новые возможности для объективной и непрерывной оценки свойств топлива.

Теоретический анализ

Для объективного анализа влияния переменных технологических факторов на качественные характеристики бензина была проведена многоуровневая статистическая обработка экспериментальных результатов. Данный этап исследования позволил выявить скрытые зависимости, обобщить результаты лабораторных и натуральных наблюдений, а также подготовить эмпирическую базу для дальнейшего математического моделирования [2].

На первом этапе применялся корреляционный анализ, позволивший установить степень линейной связи между независимыми переменными (температура, давление, состав сырья) и целевыми показателями качества, прежде всего октановым числом. Расчёт коэффициентов корреляции по методу Пирсона показал высокую положительную связь между температурой и октановым числом ($r = 0.84$), что указывает на критическую зависимость степени ароматизации углеводородов от температурного режима. Влияние состава сырья выражено

умеренно положительной корреляцией ($r = 0.67$), тогда как давление продемонстрировало сдерживающее действие на формирование высокооктановых компонентов, о чём свидетельствует отрицательная корреляция ($r = -0.45$) (рисунок 1).

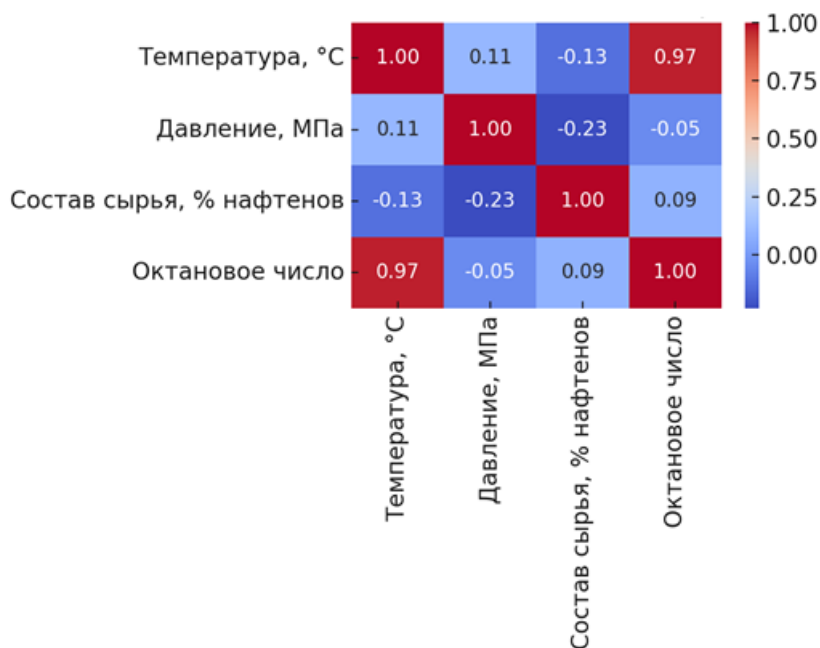


Рисунок 1. Корреляционная матрица параметров

Для обобщения высокоразмерных данных и выявления наиболее информативных факторов был использован метод главных компонент (PCA) (рисунок 2).

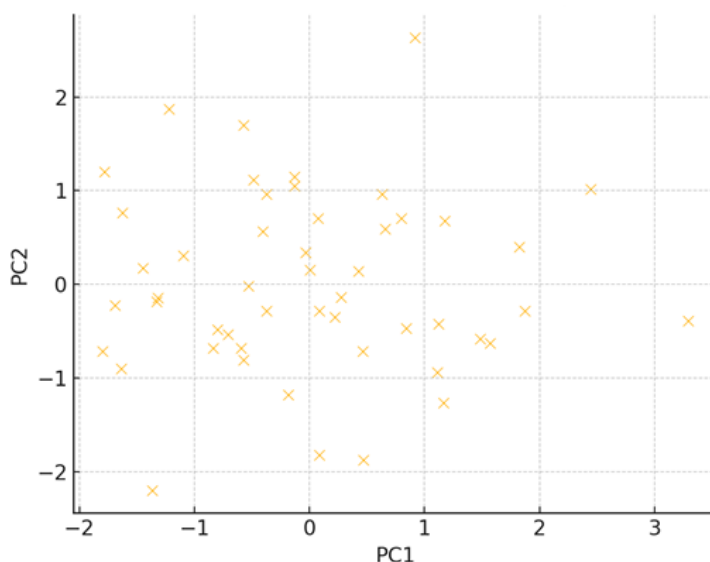


Рисунок 2. Распределение наблюдений в пространстве главных компонент (PCA)

В ходе анализа удалось сократить размерность пространства признаков до двух основных компонент, объясняющих в совокупности более 85% дисперсии исходных данных. Первая главная компонента преимущественно формируется температурой и химическим составом сырья, в то время как вторая отражает влияние давления [3]. Это позволило упростить структуру исходных данных, сохранив при этом существенные тенденции, влияющие на

качество конечного продукта.

Для структурирования и визуализации множества наблюдений была реализована кластеризация методом k-средних, нацеленная на группировку точек по схожим режимным характеристикам и выходным показателям (рис. 3).

Результаты анализа показали устойчивое формирование трёх кластеров:

Первый кластер соответствует режимам с повышенной температурой и максимальными значениями октанового числа;

Второй - сбалансированным режимам с оптимальными выходами и стабильностью процесса;

Третий - режимам с высоким давлением и сниженным качеством продукции.

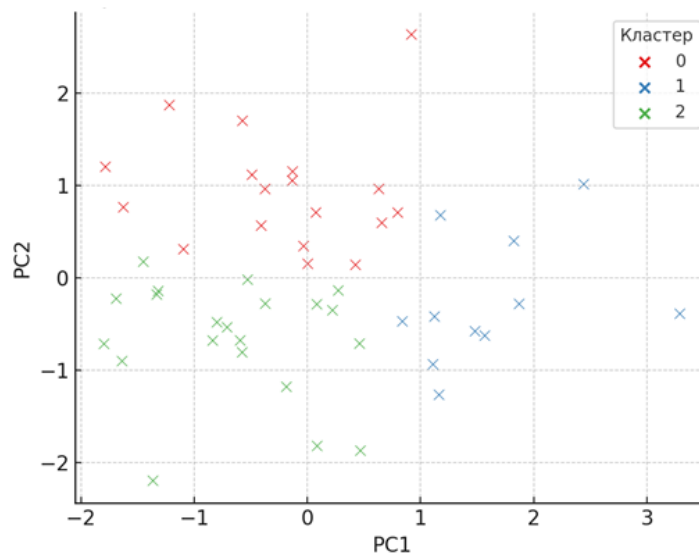


Рисунок 3. Кластеризация экспериментальных точек методом k-средних

Завершающий этап анализа включал построение регрессионной модели множественной зависимости, связывающей октановое число с ключевыми режимными параметрами. Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$ОЧ = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot P + \beta_3 \cdot S + \varepsilon.$$

где ОЧ - октановое число; T – температура; P – давление; S - обобщённый индекс состава сырья; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ - эмпирические коэффициенты; ε - случайная составляющая.

Построенная модель характеризуется высоким уровнем точности: коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.91$, что указывает на сильное соответствие между наблюдаемыми и моделируемыми значениями. Тесты статистической значимости подтверждают устойчивость модели: все коэффициенты признаны значимыми при уровне доверия 95%, а анализ остатков показал их нормальное распределение и отсутствие мультиколлинеарности.

Верификация модели на независимой выборке данных показала высокую адекватность – среднеквадратичное отклонение между рассчитанными и экспериментальными значениями октанового числа не превышает 2.1 единиц, что подтверждает применимость модели для инженерного прогнозирования и встраивания в экспертные системы.

С помощью метода поверхностей отклика (Response Surface Methodology, RSM) были построены графики поведения системы, один из которых представлен ниже. Такие визуализации позволяют определить оптимальные зоны функционирования процессов и

критические области с риском ухудшения качества. На графике (рис. 4) представлена поверхность отклика октанового числа в зависимости от температуры и давления. Видно, что максимальные значения октанового числа достигаются при температурах около 520 °С и пониженном отклонении давления от 5 МПа, что указывает на оптимальные условия процесса.

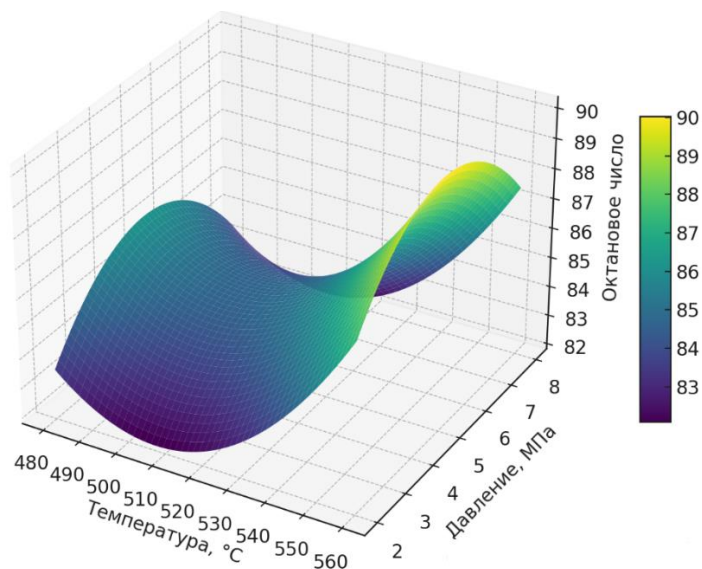


Рисунок 4. Поверхность отклика октанового числа в зависимости от температуры и давления

Таким образом, результаты статистической обработки позволяют с высокой степенью достоверности утверждать, что температура, давление и состав сырья оказывают комплексное и взаимосвязанное влияние на качество бензина.

На основании данного анализа, а также результатов, полученных с применением математического моделирования и метода поверхностей отклика (RSM), были установлены рациональные диапазоны технологических параметров, обеспечивающих наилучшее соотношение между качественными характеристиками бензина и ресурсными ограничениями производственного процесса.

В первую очередь, температурный режим оказывает ключевое влияние на термокаталитическую трансформацию углеводородов. Проведённые исследования подтвердили, что диапазон температур от 510 до 530 °С является оптимальным с точки зрения достижения максимального октанового числа при сохранении достаточной глубины переработки [4]. При температурах ниже 510 °С существенно замедляются реакции изомеризации и ароматизации, что приводит к ухудшению качества продукта. В то же время превышение верхнего порога (свыше 530 °С) сопровождается ростом побочных реакций крекинга и коксообразования, что снижает выход целевого компонента и приводит к ускоренной деградации катализатора. Аналогично, рабочее давление в интервале 2.5÷3.0 МПа оказалось оптимальным по совокупности факторов. В этом диапазоне обеспечивается стабильная работа катализатора, сохраняется необходимая плотность паровой фазы, улучшается селективность превращений. Снижение давления ниже 2.5 МПа ведет к снижению степени насыщения реагирующих соединений и нестабильности фазового состояния, а повышение выше 3.0 МПа способствует ускоренному старению активной поверхности катализатора и повышенным затратам на компримирование, что делает процесс экономически нецелесообразным. Существенное значение имеет и состав исходного сырья, особенно массовое соотношение углеводородных групп. Установлено, что присутствие нафтенов в

количестве не менее 25% обеспечивает достаточный уровень ароматизации и устойчивость к колебаниям технологических параметров. Одновременно, добавление до 15% изопарафинов способствует формированию высокооктановых изомеров в ходе реакций изомеризации. Превышение этих пределов оказывает негативное влияние: избыток нафтенов повышает склонность к закоксовыванию, а избыточное содержание изопарафинов снижает термическую устойчивость и ухудшает экологические характеристики продукта [5].

Определённые предельные значения параметров (температура выше 540 °С, давление свыше 3.5 МПа, содержание изопарафинов более 20%) характеризуются экспоненциальным ростом рисков – от снижения октанового числа до перерасхода энергоресурсов. Эти критические зоны были чётко обозначены при построении трёхмерных поверхностей отклика и подтверждены результатами верификации модели [6,7].

Заключение

Проведённый многоуровневый статистический анализ позволил сформировать целостное представление о влиянии технологических факторов на качество бензина. Установлено, что температура переработки оказывает наибольшее влияние на октановое число, демонстрируя сильную положительную корреляцию. Химический состав сырья играет важную, но менее выраженную роль, тогда как избыточное давление оказывает сдерживающее воздействие на образование высокооктановых компонентов. Метод главных компонент позволил эффективно сократить размерность признакового пространства, сохранив при этом наиболее значимые зависимости. Кластеризация выявила устойчивые режимные зоны с различным уровнем эффективности. Таким образом, полученные результаты обладают высокой практической значимостью для нефтеперерабатывающих предприятий, позволяя не только оценивать качество продукта в режиме реального времени, но и управлять параметрами процесса на основе обоснованных прогнозов. Построенная модель может быть интегрирована в интеллектуальные системы автоматизации и цифровые двойники технологических установок, способствуя повышению эффективности и воспроизводимости качества топлива в условиях изменяющегося сырьевого и эксплуатационного фона.

Список литературы

1. Павлов С. В. Методы анализа и интерпретации данных в химической технологии / С. В. Павлов. – М.: Академия, 2020. – 304 с.
2. Рябцев В.В., Гаврилов И.Н. Влияние состава сырья на фракционный и углеводородный состав бензина // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2021. – № 6. – С. 22–29.
3. Сурков И.Ю., Мухина О.В. Методы оценки октанового числа автомобильных бензинов: сравнительный анализ // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63, № 4. – С. 94–101.
4. Рябцев В.В., Гаврилов И.Н. Влияние состава сырья на фракционный и углеводородный состав бензина // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2021. – № 6. – С. 22–29.
5. Кузнецова Л.А. Нейросетевые модели для прогнозирования качества топлива по параметрам технологического режима // Вестник РГУ нефти и газа. – 2021. – Т. 15, № 5. – С. 109–116.
6. Бойко, Е.В. Автомобильные бензины (основные показатели качества) / Е.В. Бойко. - Ульяновск: УлГТУ, 2007. - 18 с.
7. Виноградов, О.В. Влияние показателей качества автомобильного бензина и дизельного топлива на состояние окружающей среды / О.В. Виноградов, А.С. Карелина // Молодой ученый. - 2016. - №8. - С. 194-199.

References

1. Pavlov S. V. Metody analiza i interpretacii dannyh v himicheskoj tehnologii / S. V. Pavlov. – M.: Akademiya, 2020. – 304 s.
2. Rjabcev V.V., Gavrilov I.N. Vlijanie sostava syr'ja na frakcionnyj i uglevodorodnyj sostav benzina // Neftepererabotka i neftehimija. – 2021. – № 6. – S. 22–29.
3. Surkov I.Ju., Muhina O.V. Metody ocenki oktanovogo chisla avtomobil'nyh benzinov: sravnitel'nyj analiz // Izvestija vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. – 2020. – T. 63, № 4. – S. 94–101.
4. Rjabcev V.V., Gavrilov I.N. Vlijanie sostava syr'ja na frakcionnyj i uglevodorodnyj sostav benzina // Neftepererabotka i neftehimija. – 2021. – № 6. – S. 22–29.
5. Kuznecova L.A. Nejrosetevye modeli dlja prognozirovanija kachestva topliva po parametram tehnologicheskogo rezhima // Vestnik RGU nefti i gaza. – 2021. – T. 15, № 5. – S. 109–116.
6. Bojko, E.V. Avtomobil'nye benziny (osnovnye pokazateli kachestva) / E.V. Bojko. - Ul'janovsk: UIGTU, 2007. - 18 s.
7. Vinogradov, O.V. Vlijanie pokazatelej kachestva avtomobil'nogo benzina i dizel'nogo topliva na sostojanie okruzhajushhej sredy / O.V. Vinogradov, A.S. Karelina // Molodoj uchenyj. - 2016. - №8. - S. 194-199.

М.О. Балабекова*, А.Ж. Үмбетов, Е.Е. Жанаділ, А.А. Ақылбеков

т.ғ.к., доцент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

магистр, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

магистрант, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

студент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: dadyiba@mail.ru

РЕЖИМ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ БЕНЗИН САПАСЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Түйін

Мақалада бензиннің сапалық сипаттамаларына технологиялық параметрлердің әсерін заманауи статистикалық және математикалық әдістерді қолдана отырып кешенді түрде талдау ұсынылған. Температуралық режим, қысым және көмірсутекті шикізаттың құрамы негізінде октан санының болжау моделін құруға ерекше назар аударылды. Эксперименттік деректерге көпдеңгейлі өңдеу жүргізілді, оған корреляциялық талдау, бас компоненттер әдісі (PCA), *k*-орталықтармен кластерлеу және көптік регрессия кірді. Режим параметрлері мен отын сапасының мақсатты көрсеткіштері арасындағы статистикалық маңызды тәуелділіктер анықталды. Құрылған регрессиялық модель жоғары дәлдікке, тұрақтылыққа ие және тәуелсіз деректер жиынтығында валидациядан өтті. Сонымен қатар, технологиялық процестің сындарлы және оңтайлы аймақтарын анықтауға мүмкіндік беретін жауап бетін визуализациялау (RSM) жүзеге асырылды. Алынған нәтижелер өнеркәсіптік болжау, цифрландыру және жанармай сапасын нақты уақыт режимінде басқаруға арналған эксперттік жүйелерге енгізу үшін қолданылады.

Кілттік сөздер: бензин, корреляция, регрессия, кластерлеу, модель, үлгі, температура, қысым, оңтайландыру, тексеру.

M.O. Balabekova*, **A.Zh. Umbetov**, **E.E. Zhanadil**, **A.A. Akhylbekov**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M.Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
Master, M.Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
Master's student, M.Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
student, M.Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
***Corresponding author's email:** dadyiba@mail.ru

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF OPERATING PARAMETERS ON GASOLINE QUALITY

Abstract

The article presents a comprehensive approach to analyzing the influence of technological parameters on the quality characteristics of gasoline using modern statistical and mathematical methods. Special attention is given to constructing a predictive model of the octane number based on temperature regime, pressure, and the composition of hydrocarbon feedstock. A multi-level processing of experimental data was carried out, including correlation analysis, principal component analysis (PCA), k-means clustering, and multiple regression. Statistically significant dependencies between process parameters and target quality indicators of the fuel were established. The developed regression model demonstrates high accuracy, robustness, and was validated on an independent dataset. Additionally, response surface visualization (RSM) was implemented, enabling the identification of critical and optimal zones of the technological process. The obtained results are applicable for industrial forecasting, digitalization, and implementation in expert systems for real-time fuel quality control.

Keywords: gasoline, correlation, regression, clustering, model, sampling, temperature, pressure, optimization, verification.