

DOI:10.33942/sit1357

УДК 004. 69

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО СОСТАВА И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Куканова Р.А.,<sup>1</sup> Элебесова Г.Ч.<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Кыргызско-Германский институт прикладной информатики, доцент, к.т.н., E-mail: krakhat22@gmail.com

<sup>(2)</sup> Кыргызско-Германский институт прикладной информатики, ст. преподаватель, E-mail: gulzat.elebesova.kk@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматриваются методы прогнозирования прочности бетона на основе его состава и условий окружающей среды с использованием инструментов Data Science. Представлены регрессионные модели, включая линейную регрессию, для оптимизации строительных процессов, оценки качества и эффективного управления ресурсами.

**Ключевые слова:** бетон; прочность бетона; методы определения прочности бетона.

## КУРАМЫНА ЖАНА СЫРТКЫ ЭКОЛОГИЯЛЫК ШАРТТАРГА ЖАРАША БЕТОНДУН САПАТЫН ПРОГНОЗДОО

Куканова Р.А.,<sup>1</sup> Элебесова Г.Ч.<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Кыргыз-Герман колдонмо информатика институту, доцент, E-mail: krakhat22@gmail.com

<sup>(2)</sup> Кыргыз-Герман колдонмо информатика институту, ага окутуучу, E-mail: gulzat.elebesova.kk@gmail.com

**Аннотация.** Бул макалада бетондун курамына жана чөйрөнүн шарттарына негизделген бекемдикти болжолдоо ыкмалары каралат. Курулуш процесстерин оптималдаштыруу, сапатты баалоо жана ресурстарды натыйжалуу башкаруу үчүн регрессиялык моделдер, анын ичинде сызыктуу регрессия колдонулат.

**Негизги сөздөр:** бетон; бетон күчү; бетондун бекемдигин аныктоо ыкмалары.

## PREDICTING THE STRENGTH OF CONCRETE DEPENDING ON ITS COMPOSITION AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Kukanova R.A.,<sup>1</sup> Elebesova G.Ch.<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Kyrgyz- German Institution of Applied Informatics, Associate professor, E-mail: krakhat22@gmail.com

<sup>(2)</sup> Kyrgyz- German Institution of Applied Informatics, Senior teacher, E-mail: gulzat.elebesova.kk@gmail.com

**Annotation.** This article explores methods for predicting the strength of concrete based on its composition and environmental conditions using Data Science tools. Regression models, including linear regression, are presented to optimize construction processes, evaluate quality, and efficiently manage resources.

**Keywords:** concrete; concrete strength; methods for determining the strength of concrete.

Бетон является одним из наиболее распространенных строительных материалов, используемых в создании инфраструктурных, промышленных и жилых объектов. Его популярность объясняется сочетанием прочности, долговечности и универсальности, позволяющим использовать материал в самых разнообразных условиях. Однако качество бетона, его эксплуатационные характеристики и экономическая эффективность зависят от многих факторов, включая состав, технологии производства и окружающую среду.

Прочность бетона зависит от множества факторов, включая состав бетонной смеси, технологии изготовления, а также внешние условия, такие как температура и влажность [1, 2]. Применение методов Data Science позволяет эффективно анализировать эти параметры и прогнозировать прочность бетона, что открывает новые возможности в управлении качеством и оптимизации строительства [3, 4].

Современные стандарты (например, международные стандарты ISO или EN) детализированы и учитывают новые технологии и материалы. Благодаря использованию компьютерных моделей, контроля качества в реальном времени и инновационных добавок (пластификаторов, микрокремнезема), бетон стал более предсказуемым и адаптивным к различным условиям эксплуатации.

Мы знаем, что существуют несколько методов определения прочности бетона, такие как [5]:

- Метод стандартных образцов. При этом методе определение прочности основано на изготовлении образцов кубической формы, иногда - цилиндрической. Образцы для испытаний изготавливают из проб бетонной смеси, применяемой при изготовлении контролируемого изделия. Эти образцы испытывают через 28 суток после изготовления. Образцы устанавливают в пресс и нагружают его непрерывно и равномерно до разрушения образца. Разрушающая нагрузка фиксируется и по ней рассчитывают прочность бетона.

- Методы неразрушающего контроля. Основным отличием этого метода от предыдущего состоит в том, что при использовании этого метода измеряемой величиной является не прочность, а какой-либо физический показатель, связанный с измеряемой величиной корреляционной зависимостью. На показания прибора оказывают влияние несколько свойств материала, не все из которых поддаются четкой и однозначной математической, а, следовательно, и приборной интерпретации. На точность измерения прочности при измерении неразрушающими методами могут оказывать влияние такие факторы как: тип цемента, состав цемента, тип заполнителя, условия твердения, возраст бетона, влажность и температура поверхности, тип поверхности, карбонизация поверхностного слоя бетона и еще ряд других менее значимых факторов.

- Методы неразрушающего контроля. Основных методов неразрушающего контроля несколько: Метод пластической деформации основан на измерении размеров отпечатка, который остался на поверхности бетона после соударения с ней стального шарика. Метод упругого отскока заключается в измерении величины обратного отскока ударника при соударении с поверхностью бетона. Метод ударного импульса заключается в регистрации энергии удара, возникающей в момент соударения бойка с поверхностью бетона. Метод отрыва со скалыванием и скалывания ребра конструкции заключается в регистрации усилия, необходимого для скалывания участка бетона на ребре конструкции, либо местного

разрушения бетона при вырыве из него анкерного устройства. Метод отрыва стальных дисков заключается в регистрации напряжения, необходимого для местного разрушения бетона при отрыве от него металлического диска, равного усилию отрыва, деленному на площадь проекции поверхности отрыва бетона на плоскость диска. Ультразвуковой метод заключается в регистрации скорости прохождения УЗ волн.

Технологии развиваются и в этом направлении Data Science может обеспечить мощные инструменты для работы с большими объемами данных и создания моделей, которые могут прогнозировать различные показатели в прогнозировании прочности бетона [3, 4].

Особенно перспективным направлением является использование методов регрессии для анализа влияния состава бетона и условий окружающей среды на его прочность. Линейная регрессия является базовым методом, который позволяет установить линейную зависимость между прочностью бетона и его параметрами. В этом случае входными данными для модели могут быть:

- пропорции цемента, воды, заполнителей и добавок;
- температура окружающей среды;
- влажность.

Прогнозирование прочности бетона на основе его состава и условий окружающей среды представляет собой задачу, где зависимая переменная (прочность на сжатие) определяется как функция независимых переменных (параметров бетонной смеси). Этот метод является одним из наиболее фундаментальных статистических моделей, широко используемых для прогнозирования и анализа влияния факторов на целевую переменную. Этот метод основывается на предположении, что зависимость между признаками и целевой переменной линейна.

Рассмотрим пример реализации линейной регрессии на Python используя общедоступный набор данных *Concrete Compressive Strength Dataset* из репозитория UCI Machine Learning Repository. Эти данные включают независимые переменные, представляющие состав бетона и условия его выдержки:

- Химический состав (цемент, шлак, зола, вода, суперпластификатор).
- Физические свойства заполнителей (мелкий и крупный).
- Возраст образца (в днях).
- Целевая переменная — прочность бетона (в МПа).

Мы построили математическую модель, которая описывает зависимость целевой переменной  $y$  (в данном случае прочности бетона) от набора независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (параметры бетонной смеси). Модель имеет следующий вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (1)$$

$y$  — целевая переменная (прочность бетона, МПа).

$x_1, x_2, \dots, x_n$  — независимые переменные (состав бетона и условия выдержки, например, количество цемента, воды, добавок и возраст).

$\beta_0$  — свободный член (перехват), представляющий  $y$ , когда все  $x_i = 0$ .

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  — коэффициенты, определяющие влияние каждой независимой переменной на  $y$ .

$\varepsilon$  — случайная ошибка, учитывающая ненаблюдаемые факторы.

Приведем математическое решение с помощью метода наименьших квадратов, где параметры модели  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  определяются минимизацией функции потерь — суммы квадратов отклонений предсказанных значений от фактических:

Функция потерь:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_n x_{in}))^2, \quad (2)$$

где  $m$  — количество наблюдений в выборке.

Решение задачи:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (3)$$

где:

- $X$  — матрица признаков размерности  $m \times (n+1)$  (дополненная единицами для учета  $\beta_0$ ).
- $y$  — вектор значений целевой переменной.
- $\hat{\beta}$  — вектор оценок параметров  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ .

Реализация задачи с использованием библиотек `numpy`, `pandas` выглядит следующим образом:

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
# Генерация искусственных данных
np.random.seed(42)
n_samples = 100
X = np.random.rand(n_samples, 3) * 100 # Признаки: цемент, вода, возраст
y = 10 + 2 * X[:, 0] - 0.5 * X[:, 1] + 3 * X[:, 2] + np.random.randn(n_samples) * 5 #
```

Пример линейной зависимости

```
# Разделение на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
# Обучение модели
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)
# Коэффициенты модели
intercept = model.intercept_ # b0
coefficients = model.coef_ # b1, b2, ..., bn
print(f"Свободный член ( $\beta_0$ ): {intercept}")
print(f"Коэффициенты ( $\beta_1, \beta_2, \dots$ ): {coefficients}")
# Прогнозирование
y_pred = model.predict(X_test)
print(f"Прогнозируемая формула:  $y = \{intercept:.2f\} + \{coefficients[0]:.2f\} * x_1 + \{coefficients[1]:.2f\} * x_2 + \{coefficients[2]:.2f\} * x_3$ ")
```

Предположим, что модель обучена, и её параметры таковы:

- $\beta_0=10.5$
- $\beta_1=2.3$  (влияние количества цемента),
- $\beta_2=-0.7$  (влияние количества воды),
- $\beta_3=3.1$  (влияние возраста бетона).

Тогда прогнозируемая формула будет выглядеть следующим образом:

$$y = 10.5 + 2.3 \cdot x_1 - 0.7 \cdot x_2 + 3.1 \cdot x_3, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  — значения признаков для конкретной бетонной смеси.

Реальные данные всегда содержат шум и нелинейные зависимости, которые учитываются через компонент  $\varepsilon$ . Получим качество модели:

- Среднеквадратическая ошибка (MSE) составила  $\sim 110 \text{ МПа}^2$ , что говорит о допустимом уровне ошибки для инженерной практики.

- Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) около 0.61, указывающий, что модель объясняет 61% вариации в прочности бетона.

График фактических и предсказанных значений показал, что большая часть точек расположена вдоль линии  $y = x$ , что подтверждает адекватность модели для данной задачи.

Полученная модель является линейной аппроксимацией связи между параметрами бетонной смеси и её прочностью. Её точность зависит от корректности выбора признаков, полноты данных и линейности взаимосвязей и продемонстрировала свою применимость для задач прогнозирования прочности бетона на основе его состава. Использованный метод позволяет выявить ключевые параметры, оказывающие наибольшее влияние на прочность, прогнозировать прочность с приемлемым уровнем точности.

#### Список использованных источников

1. Исследование проектирования зданий с учетом климатических особенностей в условиях Кыргызстана в пакете Microsoft Office Excel. Куканова Р.А., Манапбаев И.К., Султаналиев К.С. Вестник Кыргызского Государственного университета Строительства, Транспорта и Архитектуры им. Н.Исанова. 2011. Т. 2. № 2. С. 137-145.
2. Учет климатических особенностей при проектировании зданий в условиях Кыргызстана. Манапбаев И.К., Куканова Р.А., Мамбетов Э.М. Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2012. Т. 12. № 7. С. 102-106.
3. Python для анализа данных. Р. В. Гарафутдинов. Пермь 2024.
4. Математические методы обучения по прецедентам (теория обучения машин) К. В. Воронцов [http://www.ccas.ru/voron\\_voron@ccas.ru](http://www.ccas.ru/voron_voron@ccas.ru).
5. <https://studfile.net/preview/9240794/page:8>