

Сравнение методов прогнозирования для решения задач управления стабильностью асфальтобетонной смеси

Д.Н. Суворов¹, А.В. Илюхин¹, С.В. Нгуен¹, Д. Т. Зьонг²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

²Университет Винь, Вьетнам

Аннотация: Оперативная корректировка состава асфальтобетонной смеси имеет ключевое значение для достижения высокого качества асфальтобетона. Для обеспечения возможности лёгкой и оперативной корректировки рецептуры асфальтобетонной смеси, прогнозирование свойств асфальтобетона (стабильность по Маршаллу) является критически важным. Существует множество методов прогнозирования свойств асфальтобетона, но выбор того или иного метода является весьма актуальной проблемой. В данной статье предлагаются два метода прогнозирования стабильности по Маршаллу: прогнозирование по модели множественной линейной регрессии и прогнозирование по модели авторегрессии. Для оценки точности прогнозирования моделей применяем две метрики: средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE). Результаты исследования показывают, что авторегрессионная модель демонстрирует лучшие результаты прогнозирования, особенно модель авторегрессии второго порядка.

Ключевые слова: асфальтобетон, управление, корректировка состава, прогнозирование, модель множественной линейной регрессии, модель авторегрессии, стабильность по Маршаллу, точность прогноза, средняя абсолютная ошибка, средняя абсолютная процентная ошибка.

Введение

Строительство хороших дорог невозможно без качественных материалов и современных технологий. Асфальтобетон уже больше 100 лет является основным материалом для дорожного покрытия в большинстве регионов мира. Но, несмотря на это, качество дорог в разных городах и странах и во Вьетнаме получается разным.

Общая протяжённость сети автомобильных дорог во Вьетнаме составляет около 668000 км, большинство которых имеют асфальтобетонные покрытия. Климат Вьетнама по температурному режиму субтропический и тропический. Климат Вьетнама характеризуется высокой летней температурой (до +44 °С) и большим количеством осадков (среднегодовое количество от 1500 до 1900 мм), что оказывает большое влияние на состояние дорожных покрытий [1, 2]. Асфальтобетонные покрытия работают в сложных условиях под воздействием возрастающих транспортных нагрузок

и факторов окружающей среды. Из-за этого, со временем на дорожных покрытиях могут появляться разнообразные дефекты, такие, как колейность, трещины, ямы, выбоины, заплаты, выкрашивание, шелушение, разрушение кромок и другие [1-3]. Несмотря на теоретически возможные сроки службы асфальтобетонных покрытий, ограниченные 20 годами, на практике реальные сроки службы дорожных покрытий часто ограничиваются 4-5 годами и в некоторых случаях даже 1-3 годами. Это вызвано различными факторами, включая интенсивность дорожного движения, качество строительства и технического обслуживания дорог, а также воздействие агрессивных факторов окружающей среды. Поэтому большие бюджетные средства тратятся не на строительство новых дорог, а на практически непрерывный ремонт существующих [4, 5].

Цель исследования

Долговечность и качество асфальтобетонных покрытий зависят от множества факторов: начиная с разработки оптимального состава асфальтобетонной смеси, продолжая технологией её производства, правильным обращением во время транспортировки, а также строгим контролем укладки и уплотнения смеси на месте работ. Определение оптимальной рецептуры асфальтобетона имеет особое значение. На сегодняшний день задача повышения качества асфальтобетона путём оперативной коррекции рецептуры смеси является важной народнохозяйственной проблемой во Вьетнаме.

Оперативная корректировка состава асфальтобетонной смеси является задачей, требующей гораздо больших усилий, чем задача проектирования асфальтобетона. В идеальных условиях, она должна проводиться для каждого замеса смеси. Для такой частоты управления необходима соответствующая система контроля текущих значений показателей качества компонентов и готовой смеси. Контроль значений показателей качества

компонентов и готовой смеси может быть значительно улучшен с помощью прогнозирования. Точное прогнозирование позволяет предсказывать, какие изменения будут необходимы в составе асфальтобетонной смеси для достижения желаемых характеристик. Во Вьетнаме наиболее популярной методологией для проектирования состава асфальтобетонных смесей является метод Маршалла, описанный в TCVN 8820:2011 и 858/QĐ-BGTVT. Показатель стабильности по Маршаллу действительно является критически важным при оценке способности асфальтобетона сопротивляться сдвиговой нагрузке, возникающей в асфальтобетонном покрытии, особенно при высоких летних температурах. Этот показатель оценивает устойчивость асфальтобетонного слоя к деформации и деформационной устойчивости при динамических нагрузках. Таким образом, стабильность по Маршаллу является одним из ключевых параметров, которые нужно учитывать при разработке и оценке асфальтобетонных смесей и дорожных конструкций.

Материалы и методы исследования

В работе [6] для прогнозирования физико-механические характеристики асфальтобетонной смеси при заданных условиях применяет модель линейной множественной регрессии, а в работах [7, 8] показатель качества компонентов смеси, готовой асфальтобетонной смеси может быть сведён к модели авторегрессии. Точность прогнозирования напрямую влияет на точность коррекции в рецептуре асфальтобетонной смеси, поэтому выбор модели для прогнозирования очень важен.

Модель множественной линейной регрессии (Multiple linear regression model) – статистическая модель, которая используется для анализа отношений между зависимой переменной (или целевой переменной) и двумя или более независимыми переменными путём представления этих отношений в виде линейной функции [9, 10]. В модели множественной линейной регрессии уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon, \quad (1)$$

где: Y – зависимая переменная (целевая переменная); X_1, X_2, X_n – независимые переменные, которые используются для прогнозирования Y ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$ – коэффициенты регрессии, которые определяют наклон и сдвиг линейной функции; ε – случайная ошибка.

Рассмотрим модель множественной линейной регрессии (2) для прогнозирования стабильности асфальтобетонной смеси по Маршаллу. Наименования переменных X и Y представлены в таблице 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \beta_9 X_9 + \beta_{10} X_{10} + \beta_{11} X_{11} + \beta_{12} X_{12} \quad (2)$$

Таблица № 1

Наименование и обозначение параметров модели

№ п/п	Наименование переменной	Обозначение
1	Частные остатки на днище; %	X_1
2	Частные остатки на ситах 0,071 мм; %	X_2
3	Частные остатки на ситах 0,15 мм; %	X_3
4	Частные остатки на ситах 0,3 мм; %	X_4
5	Частные остатки на ситах 0,6 мм; %	X_5
6	Частные остатки на ситах 1,18 мм; %	X_6
7	Частные остатки на ситах 2,36 мм; %	X_7
8	Частные остатки на ситах 4,75 мм; %	X_8
9	Частные остатки на ситах 9,5 мм; %	X_9
10	Частные остатки на ситах 12,5 мм; %	X_{10}
11	Частные остатки на ситах 19 мм; %	X_{11}
12	Содержание битума; %	X_{12}
13	Стабильности по Маршаллу; кН	Y

Модель авторегрессии (Autoregressive model), часто обозначаемая как $AR(p)$, где p порядок модели, является статистической моделью,

используемой для анализа временных рядов данных. В этой модели значение временного ряда в определённый момент времени зависит от его предыдущих значений [11]. AR (p) модель предполагает, что текущее значение временного ряда можно объяснить как линейную комбинацию p предыдущих значений ряда плюс случайную ошибку. Уравнение AR(p) имеет следующий вид:

$$X(t) = c + \alpha_1 X(t-1) + \alpha_2 X(t-2) + \dots + \alpha_p X(t-p) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

где: $X(t)$ – текущее значение временного ряда; $X(t-1)$, $X(t-2)$, $X(t-p)$ – предыдущие значения ряда в течение p лагов времени; c – константа; α_1 , α_2 , α_p – коэффициенты авторегрессии; $\varepsilon(t)$ – случайная ошибка.

Рассмотрим модель авторегрессии (4) для прогнозирования стабильности асфальтобетонной смеси по Маршаллу.

$$X(t) = \alpha_1 X(t-1) + \alpha_2 X(t-2) + \dots + \alpha_p X(t-p) + M_x, \quad (4)$$

где: $X(t)$ – значение показателя стабильности в t-ый дискретный момент времени; $X(t-p)$ – значения показателя стабильности в (t-p)-ый момент времени; α_1 , α_2 , α_p – коэффициенты модели авторегрессии; M_x – математическое ожидание значения показателя стабильности.

Адекватность модели во многом определяются значениями её коэффициентов α_1 , α_2 , α_p . Коэффициенты α_1 , α_2 , α_p могут быть получены из решения системы уравнений Юла-Уоркера [11]. Система уравнений Юла-Уоркера имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \dots & \varphi_{p-1} \\ \varphi_1 & 1 & \dots & \varphi_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{p-1} & \varphi_{p-2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_p \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где: φ_p – автокорреляционная функция.

Так, например, для модели AP(2) уравнение (5) можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_1 \\ \varphi_2 = \alpha_1 \varphi_1 + \alpha_2 \end{cases}, \quad (6)$$

Точность прогнозирования – это показатель, который оценивает, насколько близки прогнозы к фактическим значениям. Чем ближе прогнозы к истинным данным, тем выше точность прогноза, и тем лучше модель. Для оценки точности прогноза существует несколько показателей, которые могут использоваться в зависимости от конкретной задачи и типа данных. Ниже представлены два из наиболее распространённых показателей точности прогноза:

1. Средняя абсолютная ошибка (MAE – Mean Absolute Error): MAE представляет собой среднее значение абсолютных значений разницы между прогнозами и фактическими значениями.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X(i) - \hat{X}(i)|, \quad (7)$$

где: $X(i)$ – фактическое значение для i -го наблюдения; $\hat{X}(i)$ – прогнозное значение для i -го наблюдения; N – общее количество наблюдений.

2. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE – Mean Absolute Percentage Error): MAPE измеряет средний процент отклонения прогнозов от фактических значений.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X(i) - \hat{X}(i)|}{X(i)} * 100\%, \quad (8)$$

где: $X(i)$ – фактическое значение для i -го наблюдения; $\hat{X}(i)$ – прогнозное значение для i -го наблюдения; N – общее количество наблюдений.

Результаты исследования и их обсуждение

Для вычисления коэффициентов, как модели множественной линейной регрессии, так и модели авторегрессии, был подготовлен набор данных на основе протоколов испытания асфальтобетонных смесей, произведённых на асфальтобетонном заводе «DONGSUNG» в городе Ханой в 2019 и 2020 годах. Эти протоколы содержат информацию о гранулометрическом составе смеси, содержании битума и стабильности по Маршаллу.

В данном наборе данных доступно 140 наблюдений, из которых 100 наблюдений используются для создания моделей, а оставшиеся 40 наблюдений предназначены для проверки точности прогноза моделей. Динамика значений стабильности по Маршаллу представлена на рис. 1. Важно отметить, что для каждого поднабора данных создаётся своя модель, и при изменении набора данных формируется новая модель.

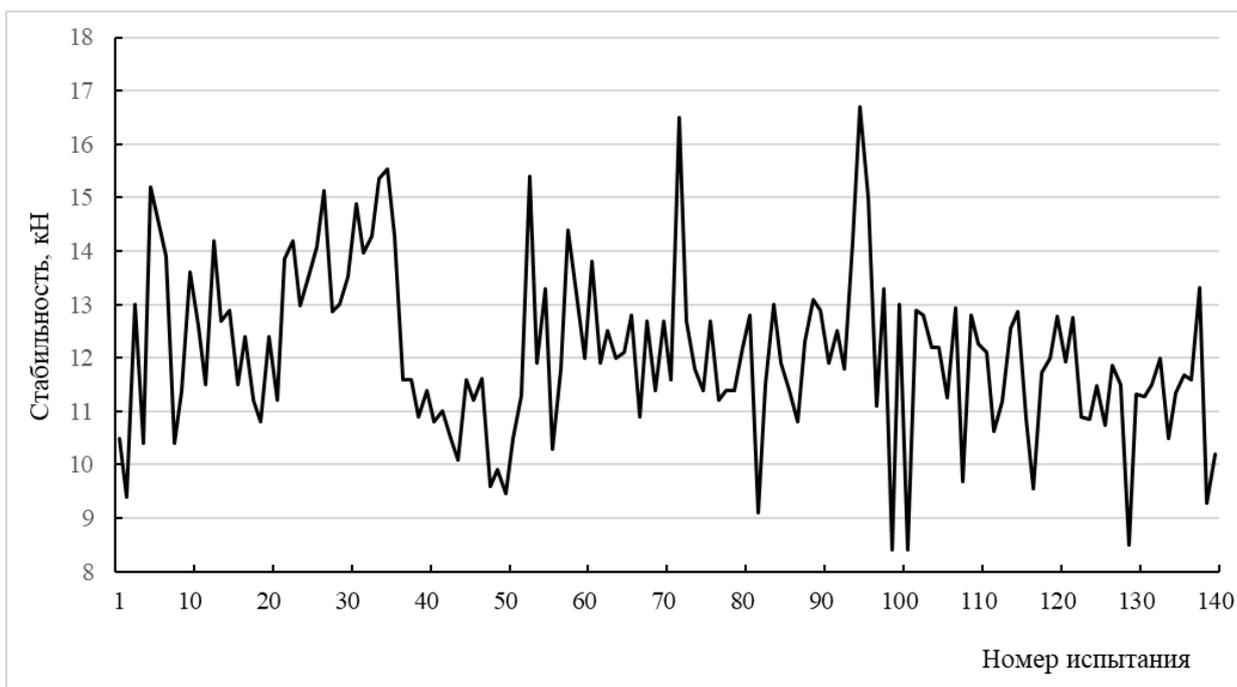


Рис. 1. – Стабильность по Маршаллу

Целью данного исследования является поиск наилучшей модели для прогнозирования. Для достижения этой цели предлагаем следующий подход: проводить прогнозирование 40 значений стабильности с использованием четырёх различных прогнозных интервалов: короткого, среднего_1,

среднего_2 и длинного. Для короткого интервала выбираем значения в диапазоне от 80 до 100 для прогнозирования 101, затем берём значения от 81 до 101 для прогнозирования 102 и так далее до последнего значения. После этого рассчитываем разницу между прогнозами и фактическими значениями, вычисляем среднюю абсолютную ошибку и среднюю абсолютную процентную ошибку. Для среднего_1 интервала выбираем значения в диапазоне от 60 до 100 для прогнозирования 101, затем берём значения от 61 до 101 для прогнозирования 102 и так далее до последнего значения. Аналогично для интервала среднего_2, но начальный диапазон от 40 до 100. После этого рассчитываем разницу между прогнозами и фактическими значениями, а также вычисляем среднюю абсолютную ошибку и среднюю абсолютную процентную ошибку. Для длинного интервала выбираем значения в диапазоне от 1 до 100 для прогнозирования 101, затем берём значения от 2 до 101 для прогнозирования 102 и так далее до последнего значения. После этого мы рассчитываем разницу между прогнозами и фактическими значениями, а также вычисляем среднюю абсолютную ошибку и среднюю абсолютную процентную ошибку.

В результате исследования были получены значения средней абсолютной ошибки (MAE) (рис. 2 а) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) (рис. 2 б) по каждой модели. Из графиков видно, что на коротком и средних интервалах модель авторегрессии обладает гораздо более низкой средней абсолютной ошибкой (MAE) и средней абсолютной процентной ошибкой (MAPE) по сравнению с множественной линейной регрессией. Однако на длинном интервале результаты моделей относительно схожи, с небольшим преимуществом для множественной линейной регрессии. В случае модели авторегрессии все три модели AP(1), AP(2), AP(3) показывают примерно одинаковую ошибку, но модель авторегрессии второго порядка демонстрирует наименьшую ошибку среди них.

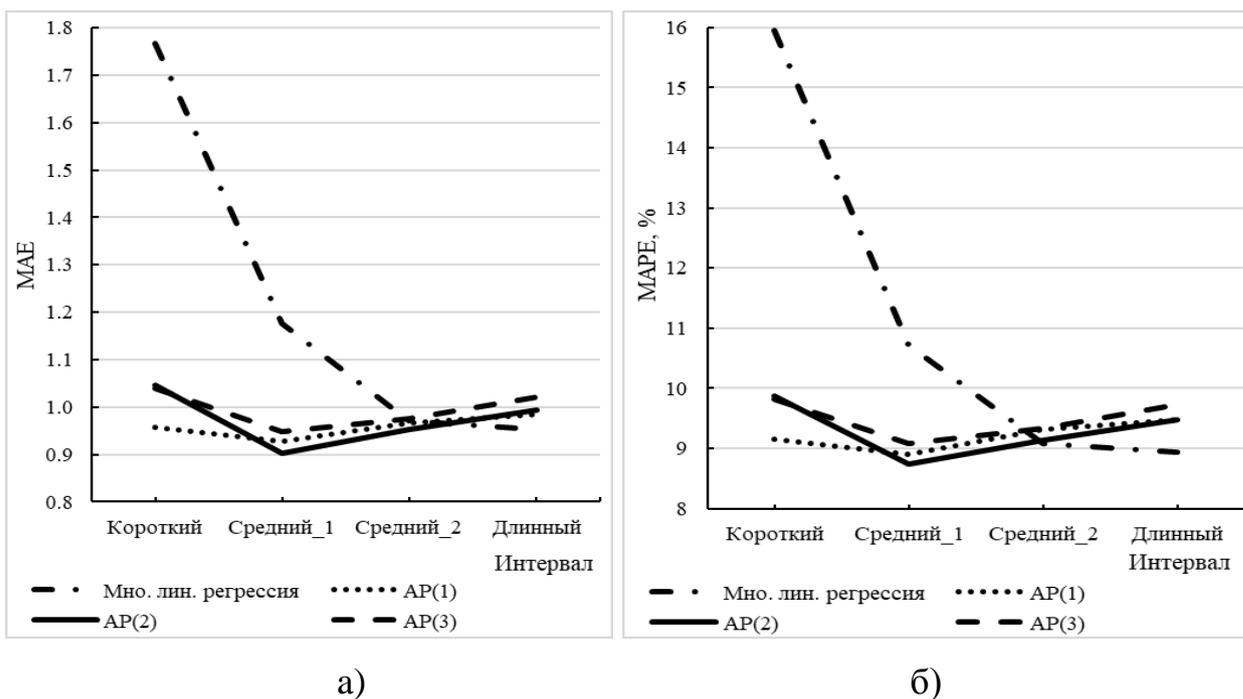


Рис. 2. а) – Средняя абсолютная ошибка моделей (MAE);

б) – Средняя абсолютная процентная ошибка моделей (MAPE)

Результаты прогноза, полученные с использованием моделей множественной линейной регрессии и авторегрессии второго порядка, и фактические значения при среднем интервале представлены на рис. 3.

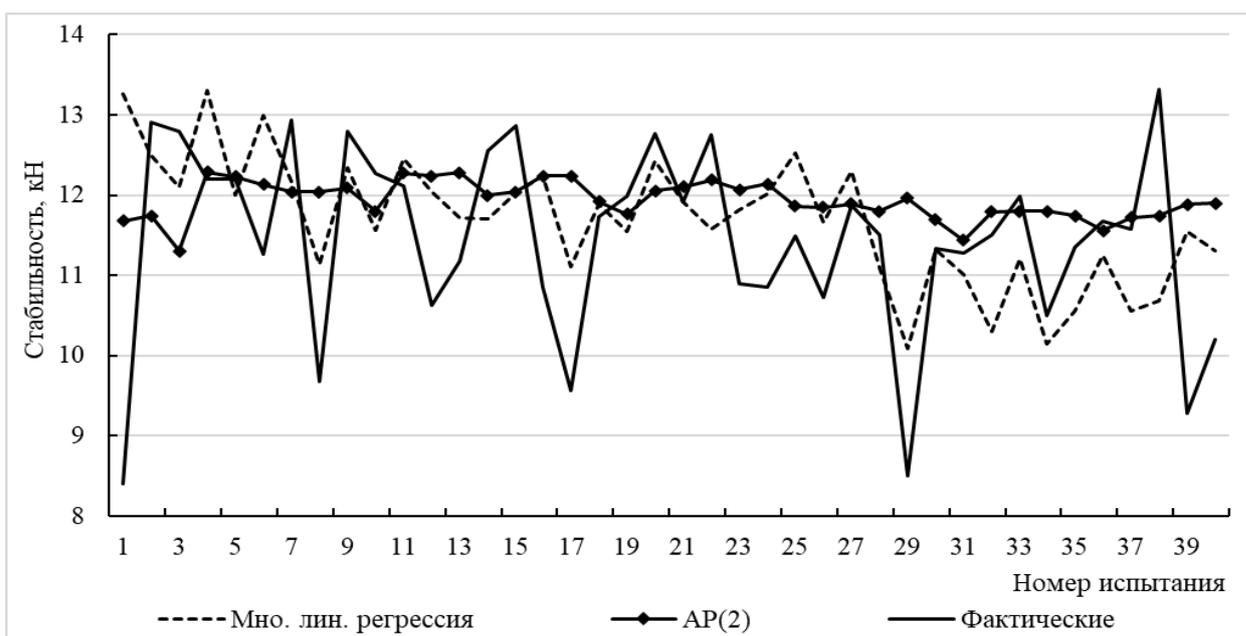


Рис. 3. Фактические и прогнозные значения стабильности по модели

Выводы

В заключение следует подчеркнуть, что использование модели авторегрессии для прогнозирования свойств асфальтобетонной смеси, таких, как стабильность по Маршаллу, демонстрирует лучшие результаты (на 38% для короткого интервала и на 18% для среднего_1 интервала) по сравнению с моделями множественной линейной регрессии. В частности, модель авторегрессии второго порядка $AR(2)$ проявляет себя как наилучший инструмент для прогнозирования свойств асфальтобетонной смеси среди всех рассмотренных моделей. Это позволяет более эффективно и точно вносить коррекции в состав асфальтобетонной смеси, что имеет критическое значение для обеспечения высокого качества дорожных покрытий и их долговечности.

Литература

1. Нгуен Фьонг Нгок, Чан Ван Зы Основные причины разрушения асфальтобетонных покрытий в Южном Вьетнаме // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2015. №1 (18). С. 56-60.

2. Нгуен Ф.Н. Причины разрушения асфальтобетонных покрытий и методы повышения их деформативной устойчивости в условиях Вьетнама // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2015. №2 (38). С. 75-83.

3. Николенко М.А., Бессчетнов М.А. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.

4. Суворов Д.Н., Нгуен Суан Виет, Зыонг Динь Ту Автоматизация контроля гранулометрического состава и расхода битума при производстве асфальтобетонной смеси // Современные наукоемкие технологии. 2023. №8. С. 64-70.

5. Кочерга В.Г., Зырянов В.В., Кулик Е.П. Всепогодный ремонт покрытий автодорог с использованием модифицированных холодных асфальтобетонных смесей // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/855.

6. Исмаилов А.М. Оптимизационно-квалиметрическая модель процесса проектирования асфальтобетонных смесей требуемого качества // Современные наукоемкие технологии. 2019. №11. С. 270-279.

7. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Попов В.П. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 1. Теоретические основы. М.: РИА, 2008. 297 с.

8. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко А.И., Попов В.П. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 2. Практические разработки. М.: РИА, 2009. 608 с.

9. Aki Roberts, John M. Roberts Multiple regression: A practical introduction, 2020. 264 p.

10. Leona S. Aiken, Stephen G. Multiple regression: Testing and interpreting interactions, 1991. 224 p.

11. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel Time series analysis. Forecast and control, 1974. 579 p.

References

1. Nguen Fyong Ngok, Chan Van Zy Nauchnyj zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzhenija. 2015. №1 (18). pp. 56-60.

2. Nguen F.N. Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2015. №2 (38). pp. 75-83.

3. Nikolenko M.A., Besschetnov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.



4. Suvorov D.N., Nguen Suan Viet, Zyong Din' Tu Sovremennyye naukoemkie tehnologii. 2023. №8. pp. 64-70.
5. Kocherga V.G., Zyrjanov V.V., Kulik E.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/855.
6. Ismailov A.M. Sovremennyye naukoemkie tehnologii. 2019. №11. pp. 270-279.
7. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Popov V.P. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizacii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi. Kniga 1. Teoreticheskie osnovy [Computer modeling in the automation of asphalt concrete mixture production. Book 1. Theoretical foundations]. M.: RIA, 2008. 297 p.
8. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Kotljarskij Je.V., Docenko A.I., Popov V.P. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizacii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi [Computer modeling in the automation of asphalt concrete mixture production. Book 2. Practical developments]. Kniga 2. Prakticheskie razrabotki. M.: RIA, 2009. 608 p.
9. Aki Roberts, John M. Roberts Multiple regression: A practical introduction, 2020. 264 p.
10. Leona S. Aiken, Stephen G. Multiple regression: Testing and interpreting interactions, 1991. 224 p.
11. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel Time series analysis. Forecast and control, 1974. 579 p.