

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>  
Russian journal of transport engineering

2018, №3, Том 5 / 2018, No 3, Vol 5 <https://t-s.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS318.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS318 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS318>)

Статья поступила в редакцию 02.08.2018; опубликована 20.09.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Тюрюханов К.Ю., Пугин К.Г., Федосеева О.А., Агапитов Д.А. Математическое моделирование эффективного состава асфальтобетона с применением отхода сталелитейного производства // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №3, <https://t-s.today/PDF/12SATS318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS318

**For citation:**

Tyuryukhanov K.Yu., Pugin K.G., Fedoseeva O.A., Agapitov D.A. (2018). Mathematical modeling of the effective composition of asphalt concrete with the use of waste steel production. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS318.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS318

УДК 625.85

ГРНТИ 67.15.63

**Тюрюханов Кирилл Юрьевич**

ФГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Ведущий инженер кафедры «Автомобильные дороги и мосты»  
E-mail: [Turuchanov.k.u@list.ru](mailto:Turuchanov.k.u@list.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=969266](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=969266)

**Пугин Константин Георгиевич**

ФГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
ФГОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия  
Профессор кафедры «Автомобили и технологические машины»  
Доктор технических наук, доцент  
E-mail: [123zzz@rambler.ru](mailto:123zzz@rambler.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=622336](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336)  
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

**Федосеева Ольга Александровна**

ФГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Старший преподаватель кафедры «Высшей математики»  
E-mail: [fedoseeva-olga-a@mail.ru](mailto:fedoseeva-olga-a@mail.ru)

**Агапитов Денис Андреевич**

ФГОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги и мосты»  
E-mail: [malay\\_@bk.ru](mailto:malay_@bk.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=653712](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=653712)

**Математическое моделирование  
эффективного состава асфальтобетона с применением  
отхода сталелитейного производства**

**Аннотация.** В статье представлена часть диссертационного исследования Тюрюханова К.Ю., результаты математического моделирования эффективного состава асфальтобетонной

смеси типа Б марки I. В настоящее время очень быстро развивается сеть автомобильных дорог, где основным материалом верхних слоев конструкции дорожной одежды служит асфальтобетон. С каждым годом происходит ужесточение требований, предъявляемых к асфальтобетонным смесям, и, в частности, к используемым каменным материалам. Что в свою очередь приводит к удорожанию определенных инертных материалов, и в итоге всего строительства в целом. Одним из способов сокращения расходов при ремонте, реконструкции, новом строительстве является использование отходов промышленных производств, который по своим прочностным характеристикам не уступают традиционным строительным материалам. В статье рассматривается математическое моделирование горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси, в состав которой входит отход сталелитейного производства, в частности отработанная формовочная смесь. В основе математических моделей, лежат физико-механические показатели, полученные в результате испытаний асфальтобетонных образцов, изготовленных в лабораторных условиях. В качестве изменяющихся факторов было выбрано два показателя, содержание битума и количество мелкого заполнителя, а именно отхода сталелитейного производства отработанной формовочной смеси, в составе асфальтобетона. Математическое моделирование позволяет более точно выполнить проектирование зернового состава, выявить определенные зависимости от изменяющихся факторов, а так же спрогнозировать прочностные характеристики асфальтобетона, состоящего из минеральных материалов разного происхождения и вяжущего, который будет в свою очередь соответствовать всем требованиям государственных стандартов Российской Федерации.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; физико-механические показатели; отработанная формовочная смесь; уравнение регрессии; отход сталелитейного производства; зерновой состав; асфальтобетон

Представленный материал является частью диссертационного исследования Тюрюханова К.Ю. В современном мире активно развивается сеть автомобильных дорог и автомагистралей, стоит отметить, что самым распространённым материалом, используемым в качестве покрытия, является асфальтобетон. Он состоит из рационально подобранной смеси минеральных материалов и органического вяжущего. Рациональное использование выделяемых денежных средств, на строительство автомобильных дорог, напрямую зависит от качества используемых материалов. Одним из способов сокращения расходов может стать использование местных дорожно-строительных материалов и отходов промышленности, которые в свою очередь являются недефицитными и по прочностным характеристикам, не уступающим природным минеральным материалам [1-5]. Ряд авторов в своих работах показывают высокую эффективность использования отходов промышленности. В работах Ядыкиной В.В. подробно рассматривается и обосновывается применение отходов Курской магнитной аномалии, а также кварцитопесчаника в составе асфальтобетона [6, 7]. В работах [8-10] исследуется возможность управления физико-механическими показателями, а также улучшения технологии укладки асфальтобетона, ремонтируемых участков автомобильной дороги.

Использование различных по происхождению материалов при производстве асфальтобетонов обязывает производителей очень тщательно производить подбор зернового состава асфальтобетонной смеси и проводить большое количество лабораторных испытаний получаемых образцов асфальтобетона. Основной целью, при проектировании зернового состава, является создание оптимальной структуры асфальтобетона способной сопротивляться нагрузкам от автотранспортных средств. В разных странах существуют различные методики проектирования зернового состава, с целью максимально вовлечь местные минеральные

материалы и отходы производств в составе асфальтобетонной смеси, при достижении требуемых прочностных характеристик готового асфальтобетонного покрытия. Все это ведет к большому экономическим издержкам и удорожанию стоимости асфальтобетона.

Из смежных отраслей науки известно, что математическое моделирование позволяет решить ряд инженерных задач, таких как, спрогнозировать поведение исследуемого объекта; минимизировать количество натуральных экспериментов; получить зависимость физико-механических показателей от изменяющихся факторов при наличии минимального количества натуральных и лабораторных исследований [11-13]. В основном большинство математических моделей представляют собой, уравнения регрессии, это можно рассматривать как геометрическое место точек математических ожиданий условных распределений целевой функции [14]. Самым понятным и простым может послужить математическая модель с уравнением парной корреляции, где единственный фактор воздействует на целевую функцию. В реальном времени на практике при производстве асфальтобетонной смеси на целевую функцию влияет большое количество факторов, тем самым искомое уравнение регрессии оказывается многомерным.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете было проведено исследование возможности использования в качестве мелкого заполнителя в асфальтобетонной смеси отработанного формовочного песка, который образуется на сталелитейном производстве. В качестве объекта исследования выступил горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон типа Б марки I [15]. Следующего состава: щебень из осадочных горных пород фракции от 5 до 20 мм – 46 %, песок из отсева дробления щебня из осадочной горной породы – 39 %, минеральный порошок МП-1 – 3 %, битум БНД 90/130 В качестве изменяемых факторов были выбраны два показателя, содержание отработанной формовочной смеси, и битума в составе асфальтобетонной смеси. Первый изменяющийся фактор – это количественное содержание вяжущего в составе асфальтобетонной смеси, и оно меняется в пределах от 4,4 % до 5,6 %, второй изменяющийся фактор – это количество мелкого заполнителя, в частности отработанной формовочной смеси, в составе асфальтобетона изменяется в пределах от 5 % до 20 %.

Для решения задачи регрессионного анализа необходимо выполнить:

- предварительную обработку входных данных;
- определиться с видом уравнений регрессии;
- расчет необходимых коэффициентов для получения уравнения регрессии;
- проверку построенной функции на адекватность по полученным результатам наблюдений.

Задача регрессионного анализа рассматривается как процесс выявления определенной функциональной зависимости  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , которая наиболее полно описывает полученные в лаборатории экспериментальные данные [16, 17].

Представленная функция называется уравнением (функцией) регрессии. Линейную математическую модель множественной регрессии представим в виде:

$$Y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i$  – случайное возмущение наблюдения  $i$ -го наблюдения,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Коэффициент регрессии  $b_i$  описывает, на какое в среднем значение изменится результативный признак  $Y$ , если переменную  $x_i$  увеличить на единицу измерения, таким образом, коэффициент регрессии  $b_i$  будет являться нормативным коэффициентом.

Представим данные наблюдений и соответствующие коэффициенты в матричной форме:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $Y$  – является вектором зависимой переменной размерности  $n \times 1$ , описывающий собой  $n$  экспериментальных наблюдений значений  $y_i$ ;

$X$  – рассматривается как матрица  $n$  экспериментальных наблюдений независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , размерность получаемой матрицы  $X$  равна  $n \times (m + 1)$ ;

$b$  – вектор, который подлежит оцениванию неизвестных параметров и имеет размерность  $(m + 1) \times 1$ ;

$\varepsilon$  – вектор возмущений, или случайных отклонений, который имеет размерность  $n \times 1$ .

Тогда математическая модель, выполненная в матричной форме (1), примет вид,

$$Y = bx + \varepsilon. \quad (3)$$

Оценка параметров многомерной модели осуществляется методом наименьших квадратов. Суть данного метода состоит в получении минимальной суммы квадратов отклонений экспериментально наблюдаемых значений  $y_i$  зависимой переменной  $Y$  от значений  $y_i^*$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), рассчитанных по уравнению регрессии (1):

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i}))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов необходимо решить систему нормальных линейных уравнений вида

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_{1i} = b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i}, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_{2i} = b_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2. \end{cases} \quad (5)$$

Для решения данной системы можно использовать матричный способ:

$$b = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (6)$$

где  $X^T$  матрица, транспонированная к матрице  $X$ ,

$(X^T \cdot X)^{-1}$  матрица, обратная к матрице  $(X^T \cdot X)$ .

Для исследования зависимости физико-механических показателей асфальтобетонной смеси от двух факторов и дальнейшей проверки значимости коэффициентов регрессии и адекватности полученных математических моделей был использован полный набор опытных данных, полученных в точках с координатами (4,4; 5,0), (4,6; 5,0), (5,4; 5,0), (5,6; 5,0), (4,4; 16,0), (4,6; 20,0), (5,4; 16,0), (5,6; 20).

В таблице 1 представлены опытные значения показателя трещиностойкости для горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I.

Таблица 1

Опытные значения трещиностойкости асфальтобетона типа Б марки I

№	$x_1$	$x_2$	$y_i$
1	4,4	5,0	4,129
2	4,4	20,0	3,971
3	5,6	5,0	3,559
4	5,6	20,0	3,558
5	4,6	5,0	3,499
6	4,6	20,0	3,318
7	5,4	5,0	3,084
8	5,4	20,0	2,746

Здесь  $x_i$  ( $i=1, 2$ ) – факторы, переменные, которые являются независимыми и управляемыми;  $y$  – опытные экспериментально полученные значения функции отклика;  $x_1$  – содержание битума сверх 100 % в асфальтобетонной смеси,  $x_2$  – количество отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетона,  $y = T(x_1, x_2)$  – показатель трещиностойкости.

Линейную математическую модель на основе полученных опытных экспериментальных данных, взятых из таблицы 1, находим в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2. \quad (7)$$

Функцию  $y$  ищем согласно метода наименьших квадратов.

$$Y = \begin{pmatrix} 4,129 \\ 3,971 \\ 3,559 \\ 3,558 \\ 3,499 \\ 3,318 \\ 3,084 \\ 2,746 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 4,4 & 5,0 \\ 1 & 4,4 & 20 \\ 1 & 5,6 & 5,0 \\ 1 & 5,6 & 20 \\ 1 & 4,6 & 5,0 \\ 1 & 4,6 & 20 \\ 1 & 5,4 & 5,0 \\ 1 & 5,4 & 20 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Вычисления производились нами с использованием табличного процессора EXEL.

Найденные коэффициенты:

$$b_0 = 5,991, b_1 = -0,473, b_2 = -0,011.$$

Таким образом, представленная выше зависимость (1) функции отклика  $y$  от факторов  $x_1$  и  $x_2$  принимает вид:

$$y = 5,991 - 0,473x_1 - 0,011x_2. \quad (9)$$

Теперь проверим разброс коэффициентов моделей по критерию Стьюдента на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  с  $k = n - m - 1$  степенями свободы ( $n = 8, m = 2$ ). Значение критерия Стьюдента равно

$$t_{0,05}(5) = 2,57.$$

Для проверки значимости коэффициентов регрессии рассчитываются  $t$  – статистики по формуле

$$t_{\text{набл } j} = \frac{b_j}{S_{b_j}}, \quad (10)$$

где  $S_{b_j}^2$  – дисперсия коэффициента регрессии  $b_j$ ;

$S^2$  – несмещенная оценка остаточной дисперсии.

Результаты представлены в таблице 2.

**Таблица 2**

**Результаты коэффициентов регрессии**

$j$	$t_{\text{набл } j}$		
1	5,197	$5,197 > 2,57$	значимый
2	3,273	$3,273 > 2,57$	значимый
3	2,584	$2,584 > 2,57$	значимый

Все коэффициенты  $b_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) считаются значимым. Таким образом, показатель трещиностойкости для горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа Б марки I смеси от  $x_1$  количества битума в асфальтобетонной смеси,  $x_2$  количества отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетона, имеет вид:

$$y = T(x_1, x_2) = 5,991 - 0,473x_1 - 0,011x_2. \quad (11)$$

Выполним необходимую проверку уравнения регрессии на адекватность, или расчета опытного значения критерия Фишера.

Проверку уравнения регрессии на адекватность произведем на основе вычисления F-критерия Фишера:

$$F_{\text{опыт}} = \frac{R^2 \cdot (n - m - 1)}{(1 - R^2) \cdot m} = 5,25, \quad (12)$$

где  $R^2$  – множественный коэффициент детерминации.

Табличное значение F-критерия Фишера, определенного на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  при степенях свободы  $k_1 = m = 2$  и  $k_2 = n - m - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$ , найденное по соответствующей таблице, равно  $F_{\text{табл}} = F_{0,05;2;5} = 4,46$ .

Так как  $F_{\text{опыт}} > F_{\text{табл}}$ , уравнение регрессии следует признать адекватным.

Опытные значения предела прочности при сжатии при 50 °С, МПа, для горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I представлены в таблице 3.

**Таблица 3**

**Предел прочности при сжатии при 50 °С, асфальтобетона типа Б марки I**

№	$x_1$	$x_2$	$y_i$
1	4,4	5,0	2,350
2	4,4	20,0	1,776
3	5,6	5,0	1,398
4	5,6	20,0	1,312
5	4,6	5,0	1,778
6	4,6	20,0	1,354
7	5,4	5,0	1,515
8	5,4	20,0	1,119

Здесь  $x_i$  ( $i=1, 2$ ) – факторы, переменные, которые являются независимыми и управляемыми;  $y$  – опытные значения функции отклика;  $x_1$  – количество битума в асфальтобетонной смеси,  $x_2$  – количество отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетоне,  $y$  – предел прочности при сжатии при 50 °С.

Линейную математическую модель на основе полученных опытных экспериментальных данных, взятых из таблицы 3, находим в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2. \quad (13)$$

$y = \Pi(x_1, x_2)$  – искомая функция отклика (предел прочности при сжатии при 50 °С),  $b_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) – коэффициенты математической модели, отражающие степень влияния изменяемых регулируемых факторов на функцию отклика.

Функцию  $y$  находим согласно метода наименьших квадратов.

$$Y = \begin{pmatrix} 2,350 \\ 1,776 \\ 1,398 \\ 1,312 \\ 1,778 \\ 1,354 \\ 1,515 \\ 1,119 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 4,4 & 5,0 \\ 1 & 4,4 & 20 \\ 1 & 5,6 & 5,0 \\ 1 & 5,6 & 20 \\ 1 & 4,6 & 5,0 \\ 1 & 4,6 & 20 \\ 1 & 5,4 & 5,0 \\ 1 & 5,4 & 20 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Вычисления производились с использованием табличного процессора EXEL. Найденные коэффициенты:

$$b_0 = 4,405, \quad b_1 = -0,504, \quad b_2 = -0,025.$$

Искомая зависимость функции отклика от независимых регулируемых факторов  $x_1$  и  $x_2$  принимает следующий вид:

$$y = T(x_1, x_2) = 4,405 - 0,504x_1 - 0,025x_2. \quad (15)$$

Следующим шагом проверим разброс коэффициентов моделей по критерию Стьюдента на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  с  $k = 8 - 2 - 1 = 5$  степенями свободы. Значение критерия Стьюдента равно  $t_{0,05}(5) = 2,57$ .

Проверку значимости коэффициентов регрессии проведем с использованием формулы (10).

Результаты проверки представлены в таблице 4.

**Таблица 4**

**Результаты коэффициентов регрессии**

$j$	$t_{\text{набл } j}$		
1	4,403	$4,403 > 2,57$	значимый
2	2,979	$2,679 > 2,57$	значимый
3	2,616	$2,616 > 2,57$	значимый

Все коэффициенты  $b_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) считаются значимым. Таким образом, предел прочности при сжатии при 50 °С горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I, от  $x_1$  – количества битума в асфальтобетонной смеси,  $x_2$  – количества отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетоне, принимает следующий вид:

$$y = T(x_1, x_2) = 5,991 - 0,473x_1 - 0,011x_2. \quad (16)$$

Выполним необходимую проверку уравнения регрессии на адекватность, или расчета опытного значения критерия Фишера.

Проверку уравнения регрессии на адекватность произведем на основе вычисления F-критерия Фишера, используя формулу (12):  $F_{\text{опыт}} = 11,68$ .

Табличное значение F-критерия Фишера, определенного на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  при степенях свободы  $k_1 = m = 2$  и  $k_2 = n - m - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$ , найденное по соответствующей таблице, равно  $F_{\text{табл}} = F_{0,05;2;5} = 4,46$ .

Так как  $F_{\text{опыт}} > F_{\text{табл}}$ , уравнение регрессии следует признать адекватным.

В таблице 5 представлены опытные данные коэффициента водонасыщения для горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I.

**Таблица 5**

**Опытные значения коэффициента водонасыщения асфальтобетона типа Б марки I**

№	$x_1$	$x_2$	$y_i$
1	4,4	5,0	2,809
2	4,4	20,0	3,833
3	5,6	5,0	1,357
4	5,6	20,0	1,030
5	4,6	5,0	2,258
6	4,6	20,0	2,413
7	5,4	5,0	1,529
8	5,4	20,0	0,896



Здесь  $x_i$  ( $i=1, 2$ ) – факторы, переменные, которые являются независимыми и управляемыми;  $Y$  – экспериментальные, опытные значения функции отклика (коэффициент водонасыщения);  $x_1$  – количество битума в асфальтобетонной смеси,  $x_2$  – количество отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетоне,  $y = B(x_1, x_2)$  – коэффициент водонасыщения.

Линейную математическую модель на основе экспериментальных, опытных данных из таблицы 5 ищем в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2. \quad (17)$$

Функцию  $Y$  находим согласно методу наименьших квадратов.

$$Y = \begin{pmatrix} 2,809 \\ 3,833 \\ 1,357 \\ 1,030 \\ 2,258 \\ 2,413 \\ 1,529 \\ 0,896 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 4,4 & 5,0 \\ 1 & 4,4 & 20 \\ 1 & 5,6 & 5,0 \\ 1 & 5,6 & 20 \\ 1 & 4,6 & 5,0 \\ 1 & 4,6 & 20 \\ 1 & 5,4 & 5,0 \\ 1 & 5,4 & 20 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Вычисления производились нами с использованием табличного процессора EXCEL. Найденные коэффициенты:

$$b_0 = 10,267, b_1 = -1,659, b_2 = 0,017.$$

Из этого следует, что искомая зависимость функции отклика  $y$  от независимых регулируемых факторов  $x_1$  и  $x_2$ , принимает следующий вид:

$$y = B(x_1, x_2) = 10,267 - 1,659x_1 + 0,017x_2. \quad (19)$$

Следующим шагом проверим разброс коэффициентов моделей по критерию Стьюдента на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  с  $k = 8 - 2 - 1 = 5$  степенями свободы. Значение критерия Стьюдента равно  $t_{0,05}(5) = 2,57$ .

Проверку значимости коэффициентов регрессии проведем, используя формулу (10).

Результаты представлены в таблице 6.

**Таблица 6**

**Результаты коэффициентов регрессии**

$j$	$t_{\text{набл } j}$		
1	5,672	3,348 > 2,57	значимый
2	4,673	2,639 > 2,57	значимый
3	2,717	2,717 > 2,57	значимый

Все коэффициенты  $b_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) считаются значимым. Таким образом, зависимость коэффициента водонасыщения для горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси

типа Б марки I, от  $x_1$  количества битума в асфальтобетонной смеси и  $x_2$  количества отработанной формовочной смеси в составе асфальтобетоне, имеет вид:

$$y = B(x_1, x_2) = 10,267 - 1,659x_1 + 0,017x_2. \quad (20)$$

Проверку уравнения регрессии на адекватность произведем на основе вычисления F-критерия Фишера, используя формулу (12):  $F_{\text{опыт}} = 15,31$ .

Табличное значение F-критерия Фишера, определенного на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  при степенях свободы  $k_1 = m = 2$  и  $k_2 = n - m - 1 = 8 - 2 - 1 = 5$ , найденное по соответствующей таблице, равно  $F_{\text{табл}} = F_{0,05;2;5} = 4,46$ .

Так как  $F_{\text{опыт}} > F_{\text{табл}}$ , уравнение регрессии следует признать адекватным.

Вывод. Проверка математических моделей физико-механических показателей таких как, показатель трещиностойкости, предел прочности при сжатии при 50 °С, коэффициента водонасыщения, позволила оптимизировать процентное содержание мелкого заполнителя (отработанной формовочной смеси) и вяжущего в составе горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б марки I. Полученные математические уравнения регрессии, помогли установить следующие закономерности, что при увеличении содержания битума в смеси уменьшается коэффициент водонасыщения, предел прочности при сжатии при 50 °С, а при увеличении мелкого заполнителя ОФС повышаются показатели трещиностойкости.

Метод множественного регрессионного анализа на сегодняшний день является одним из основных методов современной математической статистики, применяемый для нахождения неявных связей между данными наблюдений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Погромский А.С. Применение электросталеплавильных шлаков при строительстве слоев оснований дорожных одежд / Погромский А.С., Аниканова Т.В. // В сборнике: Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2013. С. 316-318.
2. Жариков В.В. Утилизация отходов литейного производства при изготовлении строительных изделий / Жариков В.В., Езерский В.А., Кузнецова Н.В., Стерхов П.П. // Вестник МГСУ. 2011. № 3-2. С. 189.
3. Пугин К.Г. Ресурсосберегающие технологии строительства асфальтобетонных дорожных покрытий с использованием отходов производства / Пугин К.Г., Калинина Е.В., Халитов А.Р. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. 2011. №2. С. 60-69.
4. C. Viklund-White Utilization of ironmaking and steelmaking slags / C. Viklund-White, G. Ye // Proceedings of the TMS Fall Extraction and Processing Conference, 1999, Vol. 1, Pages. 337-345.
5. M. Arabani Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder / M. Arabani, S.M. Mirabdolazimi // Materials

- Science and Engineering: A. Volume 528, Issues 10-11, 25 April 2011, Pages 3866-3870.
6. Ядыкина В.В. Управление процессами формирования и качеством строительных композитов с учетом состояния поверхности дисперсного сырья / Ядыкина В.В. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 374 с.
  7. Гридчин А.М. Особенности взаимодействия битума с минеральными материалами из кислых пород / Гридчин А.М., Ядыкина В.В. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. № 40. С. 13-16.
  8. Алексиков С.В. Прогнозирование физико-механических свойств грунтов земляного полотна / Алексиков С.В., Алексиков И.С., Курдюкова Л.Е. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. № 12 (31). С. 51-53
  9. Алексиков С.В. Укладка горячих асфальтобетонных смесей при ремонте покрытий городских дорог / Алексиков С.В., Абдулжалилов О.Ю., Карпушко М.О. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 17 (36). С. 35-42.
  10. Кочетков А.В. Принципы составления и управления рецептурами дорожно-строительных материалов / Кочетков А.В., Евтеева С.М., Кокодеева Н.Е., Аржанухина С.П., Глухов Т.А. // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 10-16.
  11. Кретов М.В. О математическом моделировании в дорожном строительстве. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2006. №10. С. 76-81.
  12. Кретов М.В. Математическое моделирование в дорожном строительстве / Кретов М.В., Виноградова Н.В., Воротникова О.В. // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2012. №4. С. 132-138.
  13. Матвиенко О.В. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №4 (63). С. 158-170.
  14. Пономарев В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / Пономарев В.Б., Лошкарев А.Б. // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 129 с.
  15. Пугин К.Г. Исследование гранулометрического состава отработанного формовочного песка / Пугин К.Г., Агапитов Д.А., Тюрюханов К.Ю. // В сборнике: методы проектирования и оптимизации технологических процессов сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017. С. 45-47.
  16. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. С. 451-468.
  17. Красс М.С., Чупрынов Б.П. Математические методы и модели для магистров экономики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. С. 182-201.

**Tyuryukhanov Kirill Yurievich**

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
E-mail: Turuchanov.k.u@iist.ru

**Pugin Konstantin Georgievich**

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
Perm state agro-technological university named after academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia  
E-mail: 123zzz@rambler.ru

**Fedoseeva Olga Alexandrovna**

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
E-mail: fedoseeva-olga-a@mail.ru

**Agapitov Denis Andreevich**

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
E-mail: malay\_@bk.ru

## Mathematical modeling of the effective composition of asphalt concrete with the use of waste steel production

**Abstract.** The article presents a part of the dissertation research by Tyuryukhanova K. Yu., the results of mathematical modeling of the effective composition of asphalt-concrete mixture of type B of brand I. At present, a network of highways is developing very quickly, where asphalt is the main material of the upper layers of the pavement construction. Every year, there is a tightening of requirements for asphalt concrete mixtures, and in particular for the stone materials used. That in turn leads to a rise in price of certain inert materials, and as a result of all construction in general. One of the ways to reduce costs in the repair, reconstruction, new construction is the use of industrial waste, which in its strength characteristics are not inferior to traditional building materials. The article deals with mathematical modeling of hot dense fine-grained asphalt-concrete mixture, which includes the departure of steelmaking production, in particular spent molding mixture. At the heart of mathematical models, physico-mechanical indicators are obtained as a result of testing of asphalt concrete samples made in laboratory conditions. As changing factors, two indicators were selected, the bitumen content and the amount of fine aggregate, namely the waste of steelmaking production of the spent molding mixture, in the composition of asphalt concrete. Mathematical modeling makes it possible to more accurately design the grain composition, to identify certain dependencies on changing factors, and also to predict the strength characteristics of asphalt concrete, which consists of mineral materials of different origin and astringent, which will in turn meet all the requirements of state standards of the Russian Federation.

**Keywords:** mathematical modeling; physical and mechanical indicators; spent molding mixture; regression equation; steel production waste; grain composition; asphalt concrete

### REFERENCES

1. Pogromskii A.S., Anikanova T.V. (2013). *Primenenie elektrostaleplavilnykh shlakov pri stroitelstve sloev osnovanii dorozhnykh odezhd. [Application of electric steel-smelting slags in the construction of base layers of road clothes.]* Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, pp. 316-318.
2. Zharikov V.V., Ezerskii V.A., Kuznetsova N.V., Sterkhov P.P. (2011). Utilization of wastes of foundry production in the manufacture of construction products. *Vestnik MGSU*, 3-2, p. 189. (in Russian).

3. Pugin K.G., Kalinina E.V., Khalitov A.R. (2011). Resource-saving technologies for the construction of asphalt-concrete road surfaces with the use of production waste. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Urbanistics*, 2, pp. 60-69. (in Russian).
4. Viklund-White C., Ye G. (1999). Utilization of ironmaking and steelmaking slags. *Proceedings of the TMS Fall Extraction and Processing Conference*, Vol. 1, pp. 337-345.
5. Arabani M., Mirabdolazimi S.M. (2011). Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder. *Materials Science and Engineering*, 10-11(528), pp. 3866-3870.
6. Iadykina V.V. (2009). Upravlenie protsessami formirovaniia i kachestvom stroitelnykh kompozitov s uchetom sostoianiiia poverkhnosti dispersnogo syria. [Control of the processes of formation and quality of building composites taking into account the state of the surface of dispersed raw materials.] Moscow: Publishing house of ACB, p. 374.
7. Gridchin A.M., Iadykina V.V. (2008). Features of the interaction of bitumen with mineral materials from acid rocks. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 40, pp. 13-16. (in Russian).
8. Aleksikov S.V., Aleksikov I.S., Kurdiukova L.E. (2008). Prediction of physical and mechanical properties of the soils of the roadbed. *Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University*, 12(31), pp. 51-53. (in Russian).
9. Aleksikov S.V., Abdulzhalilov O.Iu., Karpushko M.O. (2010). Laying hot asphalt-concrete mixtures during the repair of city road surfaces. *Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University*, 17(36), pp. 35-42. (in Russian).
10. Kochetkov A.V., Evteeva S.M., Kokodeeva N.E., Arzhanukhina S.P., Glukhov T.A. (2012). Principles of compilation and management of recipes for road building materials. *Building Materials*, 10, pp. 10-16. (in Russian).
11. Kretov M.V. (2006). On mathematical modeling in road construction. *Bulletin of the Baltic Federal University I. Kant*, 10, pp. 76-81. (in Russian).
12. Kretov M.V., Vinogradova N.V., Vorotnikova O.V. (2012). / Mathematical modeling in road construction, *Bulletin of the Baltic Federal University I. Kant*, 4, pp. 132-138. (in Russian).
13. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Arutiunian E.R. (2017). Mathematical modeling of shear stability of asphalt-concrete road surfaces. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 4(63), pp. 158-170. (in Russian).
14. Ponomarev V.B., Loshkarev A.B. (2006). Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: kurs lektsii. [Mathematical modeling of technological processes: a course of lectures.] Ekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI, p. 129.
15. Pugin K.G., Agapitov D.A., Tiuriukhanov K.Iu. (2017). Issledovanie granulometricheskogo sostava otrabotannogo formovochnogo peska. [Investigation of the granulometric composition of spent sand.] pp. 45-47.
16. Kremer N.Sh. (2002). Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika. Uchebnik dlia vuzov. [Theory of Probability and Mathematical Statistics. Textbook for high schools.] Moscow: UNITY-DANA, pp. 451-468.
17. Krass M.S., Chuprynov B.P. (2006). Matematicheskie metody i modeli dlia magistrov ekonomiki: Uchebnoe posobie. [Mathematical Methods and Models for Masters of Economics: A Tutorial.] Saint Petersburg: Peter, pp. 182-201.