

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS125.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS125 (<https://doi.org/10.15862/14SATS125>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Анализ напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции, моделирующей поведение дорожной одежды на плите проезжей части моста

¹Ахмаджонов М.З., ^{1, 2, 3}Валиев Ш.Н., ^{2, 4, 5, 6}Овчинников И.Г.

¹ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

³ООО «Малое инновационное предприятие «Научно-Инженерный Центр Мостов и Сооружений», Москва, Россия

⁴ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

⁵ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия

⁶ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку: Овчинников Игорь Георгиевич, e-mail: bridgesar@mail.ru

Аннотация. В работе проведен анализ состояния проблемы расчетного моделирования поведения конструкций и обращено внимание на то, что при расчетах нужно обращать внимание не только на условность расчетных схем конструкций, но и на возможность отклонения найденных по этим схемам усилий от действительного распределения усилий в конструкциях, учитывать возможный разброс используемых расчетных характеристик материалов, возможность отклонения нагрузок от их расчетных значений и не всегда в сторону уменьшения; а также неблагоприятное воздействие агрессивной эксплуатационной среды, а также неблагоприятное воздействие окружающей температуры.

Приведена методология и блок схема алгоритма расчета многослойной пластины, к исследованию которой сведена задача моделирования поведения дорожной одежды на железобетонной плите проезжей части моста при совместном действии нагрузки и температуры. Эта методология представляет собой использование итерационного алгоритма в сочетании с методом сеток. Проведенное сопоставление с известными решениями для частных случаев

показало, что эта методология дает надежные результаты и может использоваться для проведения численных исследований.

Проведено численное исследование поведения многослойной шарнирно опертой пластины, моделирующей поведение многослойной дорожной одежды на плите проезжей части моста с учетом нелинейности и разносопротивляемости составляющих материалов растяжению и сжатию при действии нагрузки и температурного поля. В частности показано, что величина изгибающего момента в дорожной одежде составляет только 0,76 % от момента, возникающего в многослойной конструкции, состоящей из железобетонной политы проезжей части и многослойной дорожной одежды, состоящей из гидроизоляции, уплотняемого асфальтобетона и литого асфальтобетона.

Ключевые слова: деформационный подход; плита проезжей части; моделирование; дорожная одежда; тепловое воздействие; напряженно-деформированное состояние

Analysis of the stress-strain state of a multilayer structure simulating the behavior of pavement on a bridge deck

¹Mirali Z. Akhmadjonov, ^{1, 2, 3}Sherali N. Valiev, ^{2, 4, 5, 6}Igor G. Ovchinnikov

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

³Small Innovative Enterprise «Scientific and Engineering Center of Bridges and Structures», Moscow, Russia

⁴Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

⁵Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

⁶Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia

Corresponding author: Igor G. Ovchinnikov, e-mail: bridgesar@mail.ru

Abstract. The paper presents an analysis of the current state of computational modeling of structural behavior and emphasizes that, in calculations, attention should be paid not only to the conditionality of structural calculation schemes but also to the possibility of deviation of the forces obtained from these schemes from the actual distribution of forces in the structures. It is necessary to consider the potential variability of the calculated material properties, the possibility of deviations of loads from their design values-which may not always be in the direction of reduction-as well as the adverse effects of an aggressive operational environment and ambient temperature.

A methodology and block diagram of the algorithm for calculating a multilayer plate, to which the problem of simulating the behavior of pavement on a reinforced concrete bridge deck under combined load and temperature effects is reduced, are presented. This methodology involves the use of an iterative algorithm in

combination with the grid method. Comparison with known solutions for particular cases has shown that this methodology yields reliable results and can be used for numerical studies.

A numerical study was conducted on the behavior of a multilayer simply supported plate simulating the behavior of multilayer pavement on a bridge deck, taking into account the nonlinearity and different resistance of the constituent materials to tension and compression under load and thermal field. In particular, it is shown that the magnitude of the bending moment in the pavement is only 0,76 % of the moment arising in the multilayer structure consisting of a reinforced concrete bridge deck and multilayer pavement, which includes waterproofing, compacted asphalt concrete, and cast asphalt concrete.

Keywords: deformation approach; bridge deck; modeling; pavement; thermal effect; stress-strain state

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Проблема расчета железобетонных мостовых сооружений с использованием современных подходов в последнее время начинает привлекать активное внимание исследователей. При этом отмечается [1; 2], что длительное время для расчета таких конструкций использовались подходы, некорректно отражающие процесс их деформирования под нагрузкой. Более корректным с нашей точки зрения является подход, основанный на применении нелинейных деформационных моделей¹, который позволяет анализировать не предельное, а реальное напряженно-деформированное состояние, возникающее в конструкции под влиянием действующих на нее нагрузок и температурных полей.

Анализ состояния проблемы расчетного моделирования поведения конструкций

Analysis of the state of the problem in computational modeling of structural behavior

Следует отметить, что для расчета конструкций широкое применение находят различные конечно элементные программные комплексы, такие, например, как MIDAS CIVIL, SAP 2000, ANSYS, Лира и другие.

При этом применение средств компьютерного расчетного анализа для моделирования поведения мостовых сооружений оказывает и отрицательное влияние на результаты расчета, ибо нередко современные проектировщики не всегда могут корректно анализировать.

Как известно, Главгосэкспертиза России еще с 2004 года настаивает на необходимости «...осуществлять расчеты не менее чем по двум сертифицированным, независимо разработанным и проверенным в практике программным комплексам, проводить сопоставительный анализ полученных результатов. Органам государственной экспертизы рекомендуется запрашивать в необходимых случаях расчетные обоснования конструктивных решений с использованием двух независимо разработанных программ» [3; 4].

Но здесь можно задать вопрос: а какие программы независимо разработанные? Мы же знаем, что большинство программных комплексов используют методики конечно-элементного анализа, то есть основываются на одинаковых предпосылках, но отличаются глубиной

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

моделирования описываемых процессов. В этом случае рекомендации об использовании двух программных комплексов может нанести вред, ибо в обоих случаях моделирование проводится практически с использованием одинаковой конечно-элементной модели, хотя при этом как бы проводится двойная проверка правильности полученных результатов, чего на самом деле нет.

В нормативных же документах рекомендации по выбору расчетных моделей конструкций для анализа довольно редко отражаются. Мало того, требования нормативных документов обычно опираются на определенные расчетные модели часто еще «докомпьютерных времен», описание которых в нормах проектирования весьма редко отражается.

Возникает вопрос. Кто же в этом случае отвечает за полученные при использовании того или иного программного комплекса результаты? На первый взгляд удивительно, но как показывает практика, за результаты расчетов отвечают те, кто использует программы. Как ни странно, разработчики программных комплексов не гарантируют надежную работу этих комплексов, причем они об этом указывают в договорах.

Проиллюстрируем сказанное куском договора: «ни при каких обстоятельствах AUTODESK не несет ответственности за какие-либо убытки или ущерб, включая утрату данных, упущенную выгоду, расходы на возмещение и иные случайные или косвенные убытки, связанные с использованием программного обеспечения» [3; 4].

Сошлемся и на такие соображения. Для расчета конструкций обычно используется аппарат строительной механики, теории упругости, теории пластичности и т. д., причем эти дисциплины считаются весьма точными и строгими. Но в литературе можно найти и такое своеобразное определение: «Строительная механика — это искусство моделировать материалы, работу которых мы не понимаем, в геометрических формах, которые мы не можем в точности проанализировать, под действием сил, которые нам неизвестны, причем делать это так, чтобы ни у кого не зародилось никаких подозрений».

Поговорив о пока мало изученных проблемах расчета конструкций с использованием существующих программных комплексов, перейдем к рассмотрению проблемы анализа напряженно-деформированного состояния дорожной одежды на железобетонной плите проезжей части моста. При этом мы будем использовать не методологию конечно-элементного анализа, как это делают многие исследователи, а будем использовать дифференциальное уравнение деформирования многослойной пластины, моделирующей поведение плиты проезжей части с дорожной одеждой на ней.

Разрешающее уравнение, моделирующее поведение дорожной одежды на железобетонной плите проезжей части моста

Resolvent equation modeling the behavior of pavement on a reinforced concrete bridge deck slab

Разрешающее уравнение, описывающее поведение указанной выше конструкции (многослойной пластины) при совместном воздействии нагрузки и температуры окружающей среды получено с использованием деформационного подхода. Расчетная схема этой конструкции показана на рисунке 1.

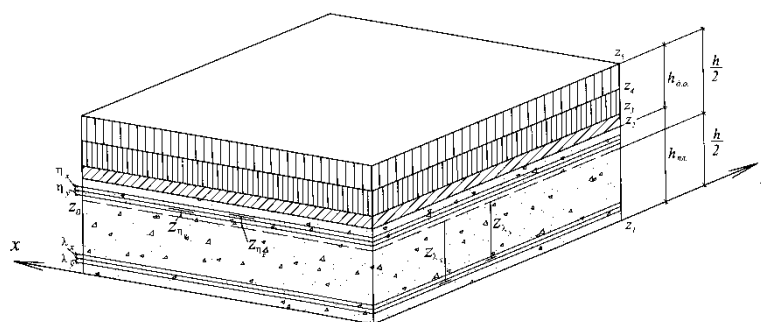


Рисунок 1. Расчетная схема дорожной одежды на плите проезжей части. Составлен автором.

Figure 1. Calculation scheme of pavement on a bridge deck slab. (developed by the author)

Параметры этой многослойной пластины зависят от свойств материала слоев дорожной одежды и железобетонной плиты. Разрешающее уравнение приведено в статье [5] и имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(G_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(G_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(G_3 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(G_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(G_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = p + q, \end{aligned} \quad (1)$$

где:

$W(x,y)$ — прогиб;

x, y — координаты точки пластины в плане;

$p(x,y)$ — внешняя нагрузка;

$q(x,y)$ — условная тепловая нагрузка;

$G_{11}, G_{12}, G_{21}, G_{22}, G_3$ — переменные жесткости, зависящие от уровня напряженно-деформированного состояния слоев пластины.

Конкретный вид этих выражений приведен в статье [5].

Заметим, что при выводе разрешающего уравнения (1) учитывалась нелинейная и неодинаковая работа бетона плиты проезжей части на растяжение и сжатие, а такая же работа материала слоев дорожной одежды, что отражалось соответствующими зависимостями. При определении вида напряженного состояния в любой точке многослойной пластины полагалось, что при $\sigma_0 \geq 0$ происходит растяжение, а при $\sigma_0 < 0$ происходит сжатие; где σ_0 — среднее напряжение. Вид физических соотношений и значения параметров материалов (бетона и материала слоев дорожной одежды) принимались разными для зон растяжения и сжатия.

Методология моделирования многослойной пластины при совместном действии внешних силовых и температурных факторов

Methodology for modeling a multilayer plate under combined external force and temperature factors

Напряженно-деформированное состояние многослойной пластины при действии силовых и температурных факторов можно исследовать при различных программах приложения нагрузки и воздействия температуры. Рассмотрим такой частный случай работы многослойной пластины:

- На верхнюю поверхность многослойной пластины прикладывается некоторая распределённая статическая нагрузка, а на краях пластины нагрузка отсутствует. Кроме того, на пластину действует определенная температура. От действия этих факторов в многослойной конструкции реализуется определенное напряжённо-деформированное состояние.
- Затем уровень нагрузки постепенно изменяется, также изменяется и температура внешней среды. В результате изменяются свойства материалов слоев пластины, что приводит к изменению закона распределения напряженно-деформированного состояния.
- Когда уровень напряжений или деформаций в какой-либо точке многослойной пластины достигает опасного уровня, считается, что реализуется предельное состояние, и конструкция выходит из строя.

Блок схема алгоритма расчета представлена на рисунке 2.

С использованием этого алгоритма была создана компьютерная программа, позволяющая производить моделирование поведения плиты проезжей части с дорожной одеждой на ней при совместном действии нагрузки и теплового поля.

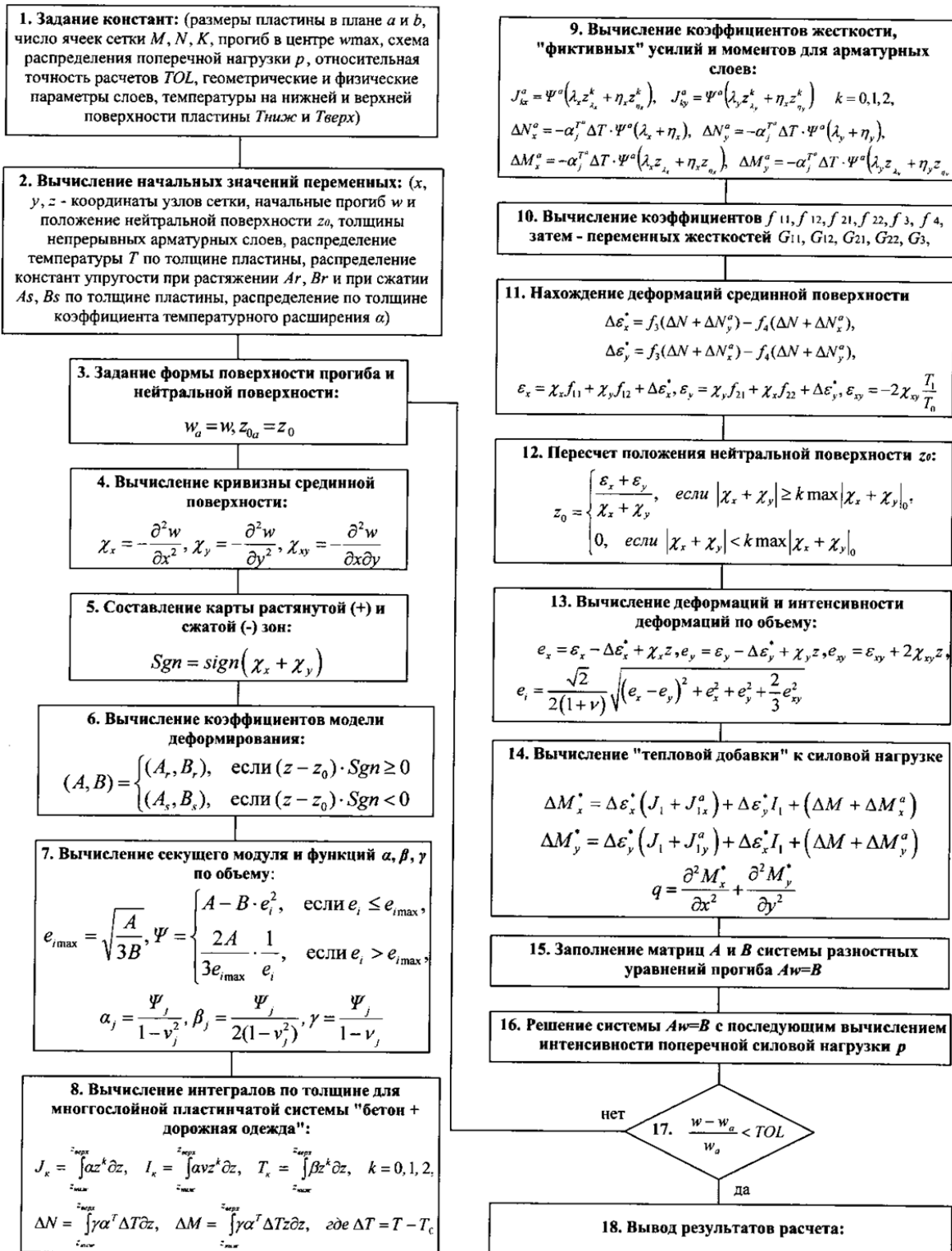


Рисунок 2. Блок схема расчета многослойной пластины подвергающейся совместному действию нагрузки и температуры. Выражения в этой блок схеме соответствуют выражениям, приведенным в статье [5] (составлен автором)

Figure 2. Block diagram for calculating a multilayer plate subjected to combined load and temperature. The expressions in this block diagram correspond to those presented in Article (developed by the author)

Решение разрешающего уравнения многослойной пластины методом сеток

Solving the resolvent equation of a multilayer plate using the grid method

Рассмотрим применение метода сеток [6; 7] для решения разрешающего уравнения вида (1).

Многослойная пластина рассматривалась в декартовой трехмерной системе координат, оси Ox и Oy которой располагались горизонтально в срединной плоскости железобетонной плиты, а ось Oz направлена вниз. Так как рассматривалась симметричная в плане пластина, то использовалась симметрия и исследовалась только четверть пластины, причём объем этой четверти покрывался трехмерной сеткой.

Идея метода сеток (или конечных разностей) заключается в аппроксимации дифференциального уравнения изгиба пластины (1) и граничных условий конечно разностными соотношениями. При этом вместо прогиба как функции двух переменных $w(x, y)$, находилась сеточная функция w_{ij} , для которой определялись значения в узлах двумерной сетки.

При шарнирном опирании пластины для её четверти пластины задаются такие граничные условия (рис. 3):

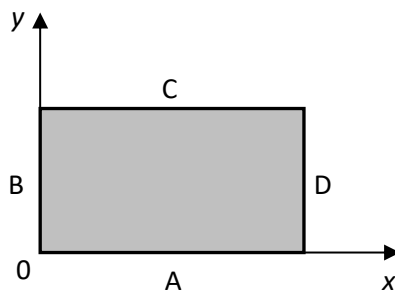


Рисунок 3. Рассматриваемая четвертая часть пластины с краями A, B, C, D (составлен автором)

Figure 3. Considered quarter of the plate with edges A, B, C, D (developed by the author)

На краю A (шарнир) $w = 0, M_y = 0,$

На краю B (шарнир) $w = 0, M_x = 0,$

На краю C (ползун в середине пластины) $Q_y = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0,$

На краю D (ползун в середине пластины) $Q_x = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0.$

Здесь M_x, M_y — погонные изгибающие моменты, а поперечные силы определяются через выражения для моментов M_x, M_y и крутящего H по известным формулам:

$$Q_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y}, \quad Q_y = \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x}. \quad (2)$$

Величины изгибающих и крутящего моментов находятся через кривизны срединной поверхности $\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$:

$$M_x = G_{11}\chi_x + G_{12}\chi_y, \quad M_y = G_{21}\chi_y + G_{22}\chi_x, \quad H = G_3\chi_{xy}. \quad (3)$$

А сами кривизны находятся через производные функции прогиба

$$\chi_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \chi_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \chi_{xy} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (4)$$

Вторые производные записываются в виде разностных формул:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &\rightarrow \frac{w_{i,j-1} - 2w_{ij} + w_{i,j+1}}{h_x^2}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &\rightarrow \frac{w_{i-1,j} - 2w_{ij} + w_{i+1,j}}{h_y^2}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} &\rightarrow \frac{w_{i-1,j-1} - w_{i-1,j+1} - w_{i+1,j-1} + w_{i+1,j+1}}{h_x h_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, N + 5$ — индекс, изменяющийся вдоль оси Oy , $j = 1, 2, \dots, M + 5$ — вдоль оси Ox , а шаги сетки вдоль осей Ox и Oy обозначены как h_x и h_y .

Для нахождения интегралов по высоте пластины использовался метод Симпсона. Форма функции нейтральной поверхности, отделяющей растянутую зоны многослойной пластины от сжатой, находилась их выражения:

$$z_0 = \begin{cases} \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\chi_x + \chi_y}. \end{cases} \quad (6)$$

Напомним, что нелинейное и неодинаковое при растяжении и сжатии материала поведение аппроксимировалось с помощью функции:

$$\Psi(e_i, T) = \begin{cases} A(T) - B(T) \cdot e_i^2, & \text{если } e_i \leq e_{i\max}(T), \\ \frac{2A(T)}{3e_{i\max}(T)} \cdot \frac{1}{e_i}, & \text{если } e_i > e_{i\max}(T). \end{cases} \quad (7)$$

В которой функция Ψ представляет собой зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций e_i (то есть секущий модуль), T — температура; $A(T)$ и $B(T)$ зависящие от температуры коэффициенты кубической кривой, аппроксимирующей кривую деформирования, e_{iMax} — максимальная интенсивность деформаций, причем при использовании кубической аппроксимации диаграммы деформирования она равна:

$$e_{iMax}(T) = \sqrt{\frac{A(T)}{3B(T)}}. \quad (8)$$

Для решения нелинейной задачи деформирования многослойной пластины использовался метод простой итерации, причем коэффициенты системы разностных уравнений, аппроксимирующий нелинейное дифференциальное уравнение изгиба пластины вычислялись через деформации.

Начальный прогиб пластины в случае жесткого защемления и шарнирного опирания задавался в виде:

$$w_{0ij} = \frac{w_{max}}{4} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{i-3}{N}\right) \right) \left(1 - \cos\left(\pi \frac{j-3}{M}\right) \right), \quad (\text{жесткое защемление}) \quad (9)$$

$$w_{0ij} = w_{max} \sin\left(\pi \frac{i-3}{2N}\right) \sin\left(\pi \frac{j-3}{2M}\right), \quad (\text{шарнирное опирание})$$

причем w_{max} — величина прогиба в центре пластины.

Заметим, что функция (9) соответствует граничным условиям, а также симметрии четверти пластины.

Для расчета пластины применялся программный комплекс Matlab 5.2, имеющий эффективный метод решения системы алгебраических уравнений, к которым сводится расчет пластины на каждой итерации.

Верификация решаемой задачи расчета пластины

Verification of the current plate calculation problem

Для проверки правильности расчетов с использованием рассмотренного алгоритма, основанного на применении метода сеток, обычно рекомендуется сравнить результаты расчета с результатами, полученными другими методами.

Согласно данным С.П. Тимошенко [8] формула для определения максимального прогиба пластины из линейно упругого материала, у которой отношение длины длинной стороны к короткой $l/b > 2,5$ имеет вид:

$$w_0^{жс} = 0,0026 \frac{pb^4}{D}, \quad w_0^{ш} = 0,0113 \frac{pb^4}{D}, \quad (10)$$

Здесь D — цилиндрическая жесткость пластины, определяемая выражением:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (11)$$

В этих формулах:

b — длина короткой стороны;

p — интенсивность нагрузки;

E — модуль упругости;

ν — коэффициент поперечной деформации.

В сравнительных расчетах считалось, что $l = 7,6$ м, $b = 3$ м, $h = 0,335$ м, $p = 0,1$ МПа, $\nu = 0,3$, $E = A$, при этом полагалось, что все слои многослойной пластины выполнены из одного линейно упругого материала с константами: $A = 3 \cdot 10^4$ МПа, $B = 0$; влияние температуры и наличие арматуры не рассматривалось.

Результаты расчетов для сеток 12×12 и 27×27 и по формулам С.П. Тимошенко для случая шарнирного опирания приведены в таблице.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение методов расчета
Comparison of calculation methods

Метод расчета <i>Calculation method</i>	w_0 , м	$(M_y)_a$, МН	$(M_x)_b$, МН	$(M_y)_0$, МН	$(M_x)_0$, МН
Метод сеток, 12×12 <i>Grid method, 12×12</i>	$9,067 \cdot 10^{-4}$	0	0	0,102	0,0404
Метод сеток, 27×27 <i>Grid method, 27×27</i>	$9,051 \cdot 10^{-4}$	0	0	0,1012	0,04041
Формулы С.П. Тимошенко <i>S.P. Timoshenko formulas</i>	$8,862 \cdot 10^{-4}$	0	0	0,09927	0,03915

Как видно, для сетки 12×12 погрешность при вычислении максимального прогиба w_0 равна 2,1 %, а для момента $(M_y)_0$. Следовательно погрешность расчета пластинки из линейно упругого материала с использованием метода сеток удовлетворительная.

С целью оценки применимости рассмотренного метода расчета для учета нелинейно упругих свойств материала оценивались прогибы для случая цилиндрического изгиба. Для этого рассматривалась пластина, у которой протяженность длинной стороны в несколько раз была больше короткой стороны. Согласно [8] в этом случае поведение пластины будет мало отличаться от поведения пластины в условиях цилиндрического изгиба.

Для случая цилиндрического изгиба уравнение (1) запишется:

$$\frac{d^2}{dy^2} \left(G_{21} \frac{d^2 w}{dy^2} \right) = p + q \quad (12)$$

в развернутой форме:

$$G_{21} \frac{d^4 w}{dy^4} + 2 \frac{dG_{21}}{dy} \frac{d^3 w}{dy^3} + \frac{d^2 G_{21}}{dy^2} \frac{d^2 w}{dy^2} - (p + q) = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим поведение пластины с граничными условиями для случая жесткого защемления:

$$w|_{y=0} = 0, \quad \left. \frac{dw}{dy} \right|_{y=0} = 0, \quad w|_{y=b} = 0, \quad \left. \frac{dw}{dy} \right|_{y=b} = 0, \quad (14)$$

Решение уравнения (13) ищем методом коллокаций [9], задавая прогиб в виде:

$$w(y) = \sum_{n=1}^N C_n \varphi_n(y) = \sum_{n=1}^N C_n \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n y}{b}\right) \right), \quad (15)$$

где:

$\varphi_n(y)$ — аппроксимирующие функции, удовлетворяющие (14);

N — количество точек сетки на оси Oy ;

C_n — коэффициенты.

Подставляя (15) в (13) потребуем выполнения (13) в точках $y_i = \frac{b}{2N} i$, $i = 1..N$. В результате получим систему алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов C_n , в результате получим функцию (15).

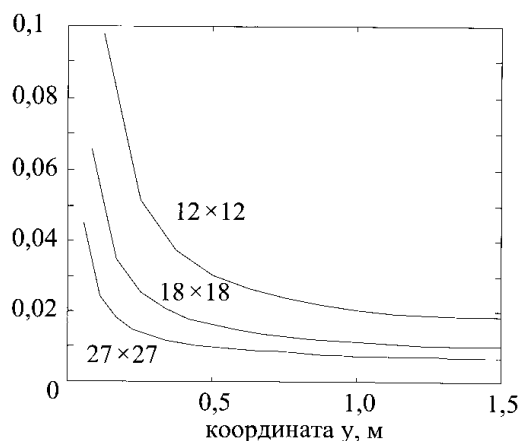


Рисунок 4. Погрешность нахождения прогиба по двум методам для случая цилиндрического изгиба (составлен автором)

Figure 4. Error in deflection determination using two methods for the case of cylindrical bending (developed by the author)

На рисунке 4 приведены графики погрешности нахождения прогиба по методу сеток и коллокации для разных сеток аппроксимации, вычисляемой согласно выражению:

$$\varepsilon = \frac{W_{сет} - W_{кол}}{W_{кол}}. \quad (16)$$

Как видно, погрешность в определении прогиба для сетки 12×12 менее 3 %, а для сетки 27×27 менее 1 %.

Как видно, сопоставление с известными решениями, а также с результатами, полученными другим методом, свидетельствует о том, что используемый итерационный алгоритм в сочетании с методом сеток дает надежные результаты и может использоваться для проведения численных исследований.

Исследование поведения многослойной дорожной одежды на плите проезжей части моста

Study of the behavior of multilayer pavement on a bridge deck slab

Разработанные методика и алгоритм использовались для исследования поведения многослойной дорожной одежды на плите проезжей части моста с учетом нелинейности и неодинаковой работы на растяжение и сжатие материалов на совместное действие нагрузки и температуры.

Проанализируем поведение шарнирно опертой многослойной пластины, подвергающейся совместному действию нагрузки и постоянной температуры. Расчет выполнялся при сетке $M \times N \times K = 24 \times 18 \times 72$, температура принята равной 20°C , а нагрузка интенсивностью 8,52 кПа.

Трехмерная эпюра прогибов четверти пластины приведена на рисунке 5.

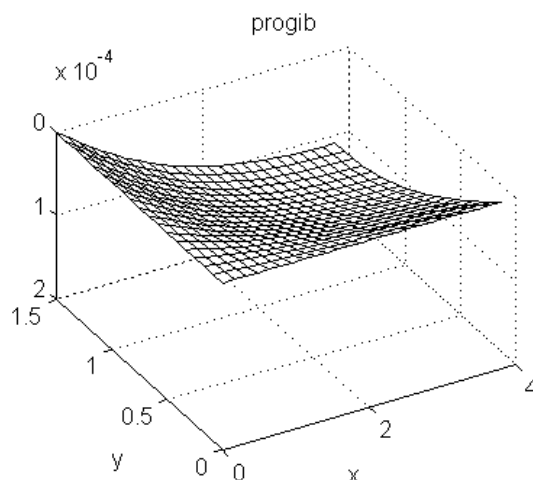


Рисунок 5. Пространственная эпюра прогибов четверти пластины (составлен автором)

Figure 5. Spatial diagram of deflections of a quarter of the plate (developed by the author)

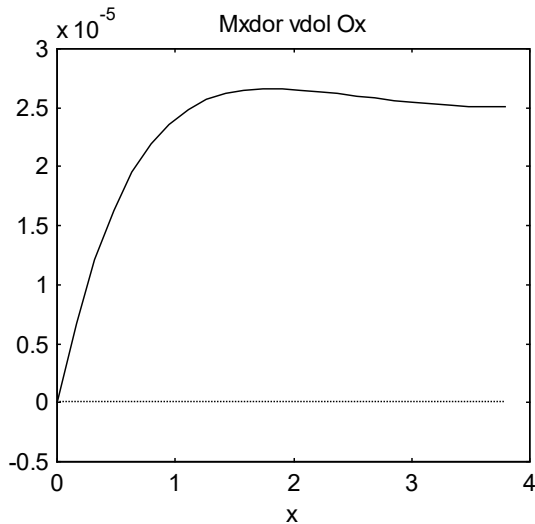


Рисунок 6. Эюра полного изгибающего момента M_x (составлен автором)
Figure 6. Epure diagram of total bending moment M_x . (developed by the author)

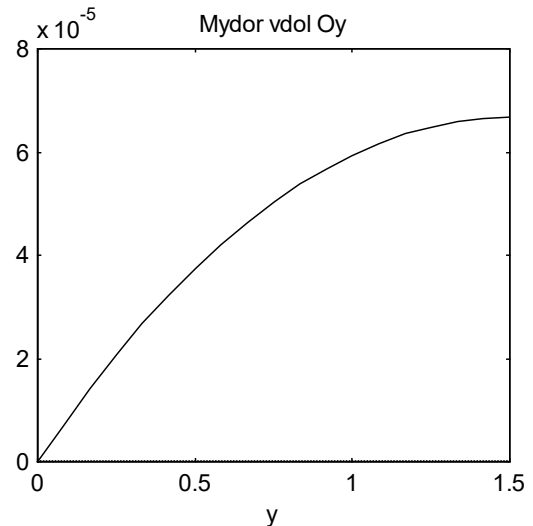


Рисунок 7. Эюра полного изгибающего момента M_y (составлен автором)
Figure 7. Epure diagram of total bending moment M_y . (developed by the author)

На рисунках 6 и 7 показаны эюры полных изгибающих моментов во взаимно перпендикулярных направлениях в центральных сечениях четверти пластины.

Заметим, что величина полного изгибающего момента M складывается из момента, который воспринимается железобетонной плитой проезжей части и момента, возникающего в дорожной одежде $M^{дор}$. На рисунках 8 и 9 в тех же взаимно перпендикулярных направлениях приведены эюры изгибающих моментов, воспринимаемых только слоями дорожной одежды.

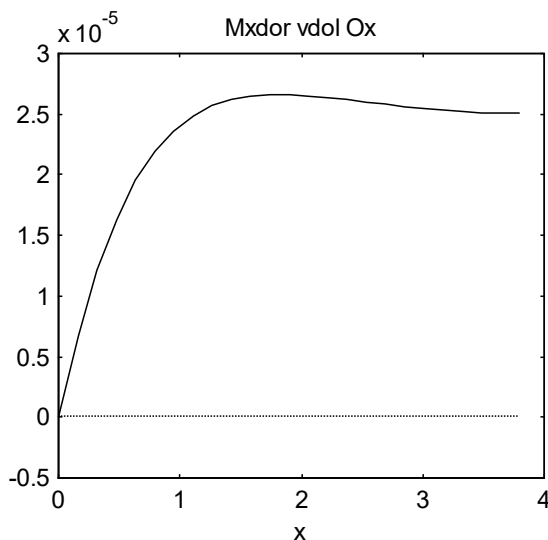


Рисунок 8. Эюра момента в дорожной одежде $M_x^{дор}$ (составлен автором)
Figure 8. Epure diagram of moment in the pavement $M_x^{дор}$ (developed by the author)

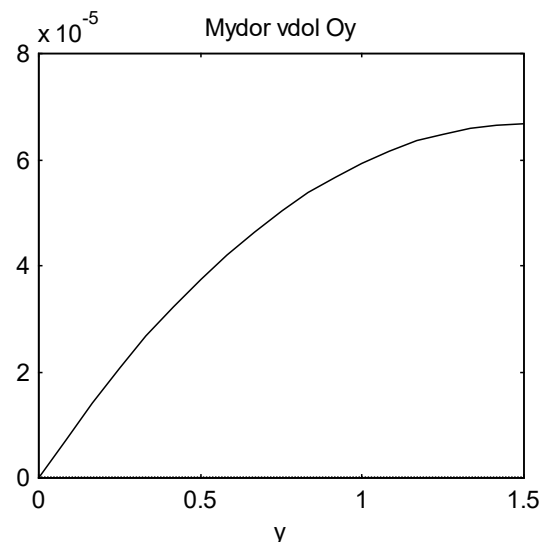


Рисунок 9. Эюра момента в дорожной одежде $M_y^{дор}$ (составлен автором)
Figure 9. Epure diagram of moment in the pavement $M_y^{дор}$ (developed by the author)

Заметим, что наибольшая величина момента в дорожной одежде $(M_y^{a\dot{t}\ddot{o}})_{\max} = 6,67 \cdot 10^{-5}$ МН составляет только 0,76 % от полного момента $(M_y)_{\max} = 8,81 \cdot 10^{-3}$ МН в центре конструкции.

На рисунках 10 и 11 приведены эпюры нормальных напряжений по высоте пластины в ее центре. Пунктирные горизонтальные линии означают расположение слоев в пластине.

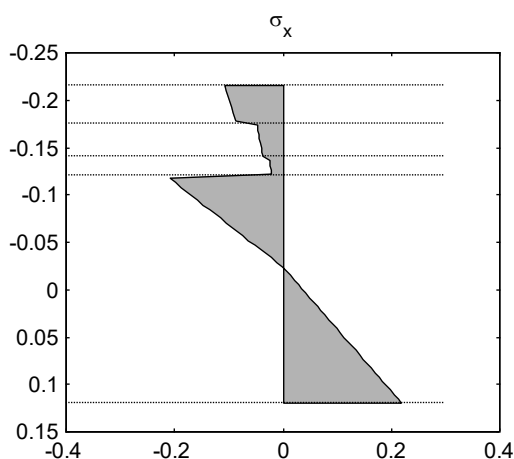


Рисунок 10. Характер эпюры нормальных напряжений σ_x по толщине пластины (составлен автором)
Figure 10. Characteristic diagram of normal stresses σ_x across the plate thickness. (developed by the author)

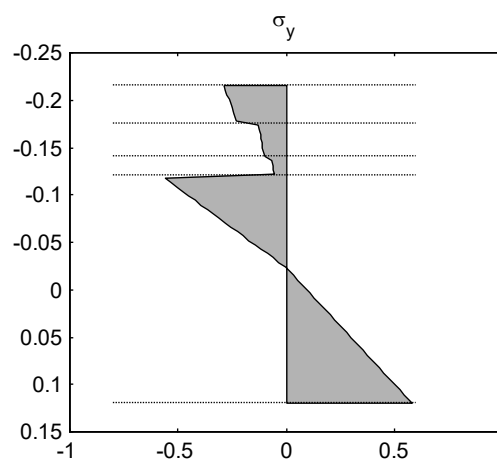


Рисунок 11. Характер эпюры нормальных напряжений σ_y по толщине пластины (составлен автором)
Figure 11. Characteristic diagram of normal stresses σ_y across the plate thickness. (developed by the author)

Наибольшее нормальное напряжение в железобетонной плите равно 0,58 МПа, в слое из литого асфальтобетона 0,29 МПа, для уплотняемого асфальтобетона 0,15 МПа, а для гидроизоляции 0,07 МПа.

В заключение отметим, что для ознакомления с зарубежными исследованиями в этой области можно использовать публикации [10–15].

Заклучение

Conclusion

В работе проведен анализ состояния проблемы расчетного моделирования поведения конструкций и обращено внимание на то, что при расчетах нужно обращать внимание не только на условность расчетных схем конструкций, но и на возможность отклонения найденных по этим схемам усилий от действительного распределения усилий в конструкциях, учитывать возможный разброс используемых расчетных характеристик материалов, возможность отклонения нагрузок от их расчетных значений и не всегда в сторону уменьшения; а также неблагоприятное воздействие агрессивной эксплуатационной среды, а также неблагоприятное воздействие окружающей температуры.

Приведена методология и блок схема алгоритма расчета многослойной пластины, к исследованию которой сведена задача моделирования поведения дорожной одежды на железобетонной плите проезжей части моста при совместном действии нагрузки и температуры. Эта методология представляет собой использование итерационного алгоритма в сочетании с методом сеток. Проведенное сопоставление с известными решениями для частных случаев показало, что эта методология дает надежные результаты и может использоваться для проведения численных исследований.

Проведено численное исследование поведения многослойной шарнирно опертой пластины, моделирующей поведение многослойной дорожной одежды на плите проезжей части моста с учетом нелинейности и разносопротивляемости составляющих материалов растяжению и сжатию при действии нагрузки и температурного поля. В частности показано, что при заданных параметрах наибольшее нормальное напряжение в железобетонной плите равно 0,58 МПа, в слое из литого асфальтобетона 0,29 МПа, для уплотняемого асфальтобетона 0,15 МПа, а для гидроизоляции 0,07 МПа. А величина изгибающего момента в дорожной одежде составляет только 0,76 % от момента, возникающего в многослойной конструкции, состоящей из железобетонной политы проезжей части и многослойной дорожной одежды, состоящей из гидроизоляции, уплотняемого асфальтобетона и литого асфальтобетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы применения современных нормативных документов для расчета транспортных сооружений / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Б.Б. Жаналиев, Н.Б. Кудайбергенов // Архитектура, строительство, транспорт. — 2024. — № 1(107). — С. 116-122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65312793> DOI: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122>. EDN: AWZRVG. (дата обращения: 12.01.2025).
2. Ахмаджонов, М.З. О применении деформационной модели к расчету железобетонных конструкций мостовых сооружений в Узбекистане / М.З. Ахмаджонов, Ш.Н. Валиев // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов 25-ой Международной научно-технической конференции / под общ. ред. В.Г. Теличко. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. — С. 5–8.
3. Овчинников, И.Г. Проектирование сложных объектов. Проблема надежности и достоверности компьютерных расчетов. Часть 1 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, В.И. Кононович // Дороги. Инновации в строительстве. — 2012. — № 18. — С. 12–15.
4. Овчинников, И.Г. Проектирование сложных объектов. Проблема надежности и достоверности компьютерных расчетов. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, В.И. Кононович // Дороги. Инновации в строительстве. — 2012. — № 19. — С. 64–66.
5. Ахмаджонов, М.З. Применение деформационного подхода к моделированию поведения железобетонной плиты проезжей части моста с учетом совместного воздействия силового и температурного факторов / М.З. Ахмаджонов, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 3. URL: <https://t-s.today/08SATS324.html>. DOI: <https://doi.org/10.15862/08SATS324>. EDN: AOZVJG (дата обращения: 12.01.2025).
6. Варвак, П.М. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций / П.М. Варвак, Л.П. Варвак. — М.: Стройиздат, 1977. — 158 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_1d09c93f317be6fd42ef6fef6de82612 (дата обращения: 12.01.2025).

7. **Веретенников, В.Н.** Вычислительные эксперименты при решении разностных уравнений для обыкновенных дифференциальных уравнений: учебно-методическое пособие / В.Н. Веретенников, В.А. Большаков. — СПб.: РГТМУ, 2019. — 60 с. URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_620151_1342ec44ada078aa524b9b7845.pdf. EDN: MNQQNM (дата обращения: 12.01.2025).
8. **Тимошенко, С.П.** Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер; пер. с англ. — М.: Физматгиз, 1963. — 636 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006238022> (дата обращения: 18.01.2025).
9. **Березин, И.С.** Методы вычислений / И.С. Березин, Н.П. Жидков. — М.: Наука, 1966. — 632 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005640300> (дата обращения: 18.01.2025).
10. **Sanabria, N.** Comparing Neural Networks and Ordered Probit Models for Forecasting Pavement Condition in New Mexico / N. Sanabria, V. Valentin, S. Bogus, G. Zhang, E. Kalhor // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2017. — Vol. 2639, No. 1. — P. 110–119. — URL: <https://trid.trb.org/view/1437450>. DOI: <https://doi.org/10.3141/2639-13>. (дата обращения: 18.01.2025).
11. **Rezaei-Tarahomi, A.** Artificial neural network models for airport rigid pavement top-down critical stress predictions: Sensitivity evaluation / A. Rezaei-Tarahomi, H. Ceylan, K. Gopalakrishnan, S. Kim, O. Kaya [et al.] // Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology. — Reston: American Society of Civil Engineers, 2019. — P. 302–312. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482476.030>. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482476.030>. (дата обращения: 18.01.2025).
12. **Gransberg, D.D.** Sustainable pavement preservation and maintenance practices / D.D. Gransberg, S.L. Tighe, D. Pittenger, M.C. Miller // Climate change, energy, sustainability and pavements / eds. K. Gopalakrishnan, W. Steyn, J. Harvey. — Heidelberg: Springer, 2014. — P. 393–418. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44719-2_14. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_14. (дата обращения: 18.01.2025).
13. **Basnet, K.S.** Pavement performance model for road maintenance and repair planning: a review of predictive techniques / K.S. Basnet, J.K. Shrestha, R.N. Shrestha // Digital Transportation and Safety. — 2023. — Vol. 2, No. 4. — P. 253–267. URL: <https://www.maxapress.com/article/doi/10.48130/DTS-2023-0021>. DOI: <https://doi.org/10.48130/DTS-2023-0021>. EDN: BTQNH. (дата обращения: 18.01.2025).
14. **Grishin, I.** Computational Model of Rib-Reinforced Plate / I. Grishin, R. Kayumov, G. Ivanov, O. Petropavlovckikh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 890. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/890/1/012036>. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012036>. EDN: YZMMPR. (дата обращения: 18.01.2025).
15. **Liu, Y.** Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials / Y. Liu, P. Su, M. Li, Z. You, M. Zhao // Journal of Traffic and Transportation Engineering. — 2020. — Vol. 7. — P. 573–579. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756420301021?via%3Dihub>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>. (дата обращения: 18.01.2025).

Сведения об авторах:

Ахмаджонов Мирали Зафар угли — аспирант кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, e-mail: miralee7@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3919-8489>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1288734

Валиев Шерали Назаралиевич — кандидат технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия, доцент, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, генеральный директор, ООО «Малое инновационное предприятие «Научно-Инженерный Центр Мостов и Сооружений», Москва, Россия, e-mail: vshn2014@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6326-2233>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=284723
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/HLX-1425-2023>

Овчинников Игорь Георгиевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор базовой кафедры «АО Мостострой-11», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты», ФГАОУ ВО

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, профессор кафедры «Мосты и транспортные тоннели», ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>
ПИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>

Статья получена: 18.02.2025. Принята к публикации: 22.04.2025. Опубликовано онлайн: 29.04.2025.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Zhanaliev B.B., Kudaibergenov N.B. Issues of application of modern regulatory documents for the calculation of transportation structures. *Architecture, construction, transport*. 2024;1(107):116–122. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122> (In Russ., abstract in Eng.).
2. Akhmadzhonov M.Z., Valiev Sh.N. [On the application of the deformation model to the calculation of reinforced concrete structures of bridge structures in Uzbekistan]. In: [*Current issues in construction and the construction industry: collection of materials from the 25th International Scientific and Technical Conference*]. Tula: Tula State University; 2024. p. 5–8. (In Russ.).
3. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Kononovich V.I. [Design of complex objects. The problem of reliability and validity of computer calculations. Part 1]. *Roads. Innovations in construction*. 2012;(18):12–15. (In Russ.).
4. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Kononovich V.I. [Design of complex objects. The problem of reliability and validity of computer calculations. Part 2]. *Roads. Innovations in construction*. 2012;(19):64–66. (In Russ.).
5. Akhmadjonov M.Z., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.G. Application of deformation approach to reinforced concrete slab behaviour simulation of bridge roadway taking into account the combined effect of force and temperature factors. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2024;11(3). <https://doi.org/10.15862/08SATS324> (In Russ., abstract in Eng.).
6. Varwak P.M., Varwak L.P. [The grid method in problems of calculating building structures]. Moscow: Stroyizdat; 1977. 158 p. Available from: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_1d09c93f317be6fd42ef6fef6de82612 (accessed 12th January 2025). (In Russ.).
7. Veretennikov V.N., Bolshakov V.A. [Computational experiments in solving difference equations for ordinary differential equations]. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2019. 60 p. Available from: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_6201511342ec44ada078aa524b9b7845.pdf (accessed 12th January 2025). (In Russ.).
8. Timoshenko S.P., Voinovsky-Krieger S. [Plates and shells]. Moscow: Fizmatgiz; 1963. 636 p. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006238022> (accessed 18th January 2025). (In Russ.).
9. Berezin I.S., Zhidkov N.P. [Calculation methods]. Vol. 1. Moscow: Nauka; 1966. 632 p. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005640300> (accessed 18th January 2025). (In Russ.).
10. Sanabria N., Valentin V., Bogus S., Zhang G., Kalthor E. Comparing Neural Networks and Ordered Probit Models for Forecasting Pavement Condition in New Mexico. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2017;2639(1):110–119. <https://doi.org/10.3141/2639-13> (In Eng.).
11. Rezaei-Tarahomi A., Ceylan H., Gopalakrishnan K., Kim S., Kaya O. [et al.] Artificial neural network models for airport rigid pavement top-down critical stress predictions: Sensitivity evaluation. In: *Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology*. Reston: American Society of Civil Engineers; 2019. p. 302–312. <https://doi.org/10.1061/9780784482476.030> (In Eng.).
12. Gransberg D.D., Tighe S.L., Pittenger D., Miller M.C. Sustainable pavement preservation and maintenance practices. In: *Climate change, energy, sustainability and pavements*. Heidelberg: Springer; 2014. p. 393–418. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_14 (In Eng.).

13. Basnet K.S., Shrestha J.K., Shrestha R.N. Pavement performance model for road maintenance and repair planning: a review of predictive techniques. *Digital Transportation and Safety*. 2023;2(4):253–267. <https://doi.org/10.48130/DTS-2023-0021> (In Eng.).
14. Grishin I., Kayumov R., Ivanov G., Petropavlovckikh O. Computational Model of Rib-Reinforced Plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;890:012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012036> (In Eng.).
15. Liu Y., Su P., Li M., You Z., Zhao M. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020;7:573–579. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003> (In Eng.).

Information about the authors:

Mirali Z. Akhmadjonov — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, e-mail: miralee7@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3919-8489>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1288734

Sherali N. Valiev — Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, Small Innovative Enterprise «Scientific and Engineering Center of Bridges and Structures», Moscow, Russia, e-mail: vshn2014@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6326-2233>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=284723

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/HLX-1425-2023>

Igor G. Ovchinnikov — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>

Submitted: 18th February 2025. Revised: 22nd April 2025. Published online: 29th April 2025.