

УДК 625.7/.8

Онищенко А.М., канд. техн. наук, Аксьонов С.Ю., канд. техн. наук, Дмитриченко А.М., канд. техн. наук, Гаркуша М.В., Різніченко О.С.

### МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА ПІВДЕННОМУ МОСТОВОМУ ПЕРЕХОДІ

**Анотація.** У статті розглянуто чисельний метод визначення напружено-деформованого стану асфальтобетонного покриття Південного Мостового Переходу, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності – методу скінченних елементів. Застосування чисельного моделювання обумовлюється тим, що схеми навантаження ускладнюються і потребують просторового вирішення задачі з метою підвищення якості проектування покриття мостового переходу. У статті наведено приклад розподілу полів деформацій у частині мостового переходу при транспортному навантаженні.

**Ключові слова:** рівняння теорії пружності, метод скінченних елементів, інженерно-розрахунковий комплекс ANSYS, напружено-деформований стан, нормальні розтягуючі напруження, рівняння регресії, ортотропна плита мостового переходу.

УДК 625.7/.8

Onischenko A.M., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Aksenov S.Yu., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Dmytrychenko A.M., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Garkusha M.V., Riznichenko O.S.

### SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT OF THE SOUTH BRIDGE

**Abstract.** This article to used numerical method for determination of stain and tension pavement South highway condition based on the solution of elasticity theory equations - Finite Element. The application of numerical modeling is determined by the fact that load patterns are becoming more complicated and require spacial concept in order to enhance the quality of overpass pavement design. In article atypical example for deformation fields distribution in one of the bridge crossing sections under traffic load is provided

**Keywords:** Elasticity theory equations, method finite element, engineering calculating complex ANSYS, pavement tension state, spreading the tension, regression equation, orthotropic slab of bridge crossing.

УДК 625.7/.8

Онищенко А.Н., канд. техн. наук, Аксенов С.Ю., канд. техн. наук, Дмитриченко А.М., канд. техн. наук, Гаркуша М.В., Ризниченко А.С.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ЮЖНОМ МОСТОВОМ ПЕРЕХОДЕ

**Аннотация.** В статье рассмотрен численный метод определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия Южного мостового перехода, основанный на решении уравнений теории упругости - метода конечных элементов. Применение численного моделирования объясняется тем, что схемы нагрузки усложняются и требуют пространственного решения задачи с целью повышения качества проектирования покрытия мостового перехода. В статье приведен пример распределения полей деформаций в части мостового перехода при транспортном нагружении.

**Ключевые слова:** уравнения теории упругости, метод конечных элементов, инженерно-расчетный комплекс ANSYS, напряженно-деформированное состояние, нормальные растягивающие напряжения, уравнение регрессии, ортотропная плита мостового перехода.

**Актуальність проблеми.** З урахуванням того, що на проїзній частині Південного мостового переходу діє складне просторове навантаження доцільно використати чисельний метод визначення напружено-деформованого стану покриття, що базується на розв'язанні рівнянь теорії пружності – методу скінченних елементів, як найбільш універсального і ефективного. Його особливістю є безпосередній перехід від континуального об'єкту до дискретного аналізу шляхом ділення області об'єкту, який досліджується, на ряд під-областей та апроксимації полів переміщень, зусиль, напружень, наприклад, з використанням інженерно-розрахункового комплексу ANSYS.

Алгоритм аналітичного опису тривимірної чисельної моделі. Застосування чисельного моделювання обумовлюється тим, що схеми навантаження ускладнюються і потребують просторового вирішення задачі з метою підвищення якості проектування покриття мостового переходу. Тривимірне моделювання має за основну мету усунути недоліки дослідження силового навантаження та міцнісних характеристик покриття під навантаженням від транспорту у плоскій постановці. Це дає можливість більш об'єктивно оцінити ефективність взаємодії транспорту з покриттям мостового переходу з огляду на мінімальну зміну покриття.

Для цього широко застосовують інженерно-розрахункові комплекси типу Ansys, SolidWorks, Inventor та інші, які дозволяють використовувати встановлені особливості поведінки покриття під навантаженням.

Використання таких комплексів дозволяє зменшити терміни виконання технічних розрахункових операцій, суттєво скоротити термін отримання результатів досліджень та строки проектування. Крім кількісних показників, використання таких комплексів дозволяє отримати візуально якісну картину отриманих результатів.

Модель частини мостового переходу виконана в середовищі Mechanical Desktop, що наведена на рис. 1.

Фізико-механічні властивості покриття та металоконструкції, навантаження, контакти та граничні умови до вирішення задачі

**Urgency of a problem.** Taking account of the fact that there is complex space load on the carriageway of the South highway stream crossing it is reasonable to use numerical method for determination of stain and tension pavement condition based on the solution of elasticity theory equations - Finite Element Method as the most universal and efficient one. Its particular feature is a direct changeover from the continual subject to sampling analysis by the way of investigated subject area division into the range of sub-areas and approximation of displacement fields, forces, tension, for example with the application of engineering calculating complex ANSYS.

Analytic Description of Three-D Numerical Model Algorithm. The application of numerical modeling is determined by the fact that load patterns are becoming more complicated and require spacial concept in order to enhance the quality of overpass pavement design. Three-D modeling main goal is to remove the drawbacks in the investigation of power load and pavement strength properties under traffic load in flat setting. This enables us to estimate more efficiently traffic and overpass pavement interaction efficiency considering the minimum pavement change.

Engineering calculating complexes like ANSYS, SolidWorks, Inventor etc. are widely use for this purpose and enable us to use specified pavement behavior patterns under load.

The application of such complexes allows to shorten the engineering design operations performance period, to decrease essentially the investigation result generation term as well as the design time. Accept for quality quantitative characteristics the use of such complexes enables us to receive high quality visual picture of the results obtained.

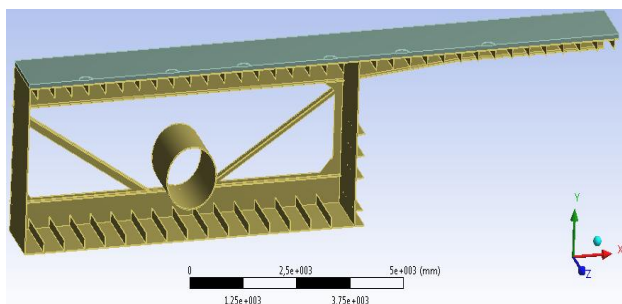
The model of overpass part is created in Mechanical Desktop shown in (Fig. 1.).

Mechanical and physical pavement and structural steel parameters, loads, contacts and boundary conditions for the purposes of task solution have been created within Ansys framework as well as models breakdown into the network of fine elements

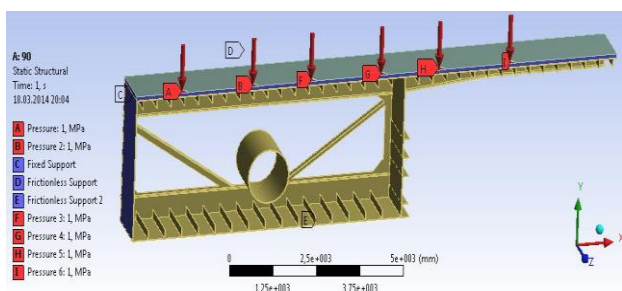
виконано в середовищі Ansys. Там же здійснено розбивання моделей на сітку скінченних елементів у вигляді тетраедрів.

Наведемо алгоритм аналітичного опису задачі у тривимірному просторі для просторового елемента моделі (тетраедра), описаний в [1,7]. Розв'язання задачі для тривимірної підсистеми виконано в середовищі Ansys.

Розрахункову схему дії зовнішніх навантажень на покриття мостового переходу, в даному випадку, приведено на рис. 2.



**Рисунок 1** – Модель частини мостового переходу



**Рисунок 2** – Схема навантажень покриття мостового переходу від транспорту

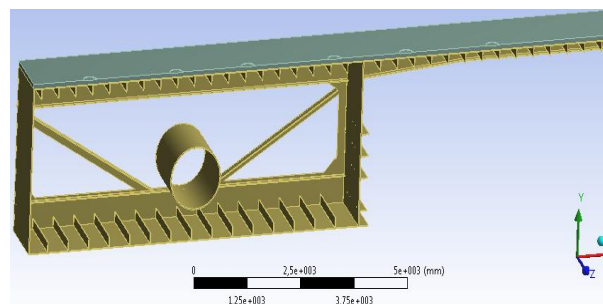
На покриття мостового переходу діє тиск  $P$  від коліс транспортних засобів, що рухаються в три ряди по мостовому переходу. Тиск  $P$  рівномірно по п'ятну контакту.

Відстань між колесами прийнята 2100 мм. Покриття розглядається при виконанні розрахунків як пружне тіло та статично не визначена конструкція мостового переходу. В якості змінних факторів, які на нашу думку чинитимуть найбільш суттєвий вплив на зміну напруженого стану покриття (розтягуючи напруження), при інших незмінних умовах, прийнято наступні:

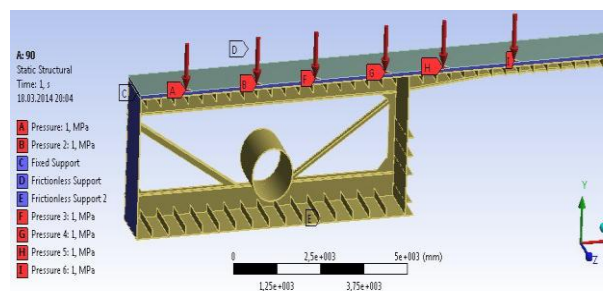
in the tetrahedron form.

Here is the algorithm of task analytic description in the three-dimensional space for a special model element (tetrahedron), described [1,7]. Task solution for three-dimensional sub-system made within Ansys framework.

Analytical model of the external loading impact on the overpass pavement in this case is provided in (Fig. 2.).



**Figure 1** – The model of the bridge



**Figure 2** – Model of loading on the overpass pavement the bridge from traffic

Analytical model of the external loading impact on the overpass pavement in this case is provided.

The overpass pavement is being influenced by the pressure  $P$  from the traffic wheels moving in three lines along the bridge overpass. Pressure  $P$  is proportionally distributed over the contact patch.

The distance between the wheels is accepted as 2100 mm. The pavement is considered to be an elastic body and statically undetermined highway stream crossing structure as calculating. The following factors are accepted to be changeable factors which in our opinion will have the most substantial influence on the change of pavement tension state (spreading the

$X_1$  – товщина покриття,  $h$ , мм;  
 $X_2$  – тиск від транспортних засобів на покриття,  $P$ , МПа  
 $X_3$  – модуль пружності покриття,  $E$ , МПа;  
 $X_4$  – діаметр п'ятна контакту,  $D$ , мм.  
 Рівні змінних факторів та інтервали їх варіювання вибрані на основі аналізу типів покриття, його властивостей, навантажень та п'ятен контакту від транспортних засобів, які приведено в таблиці 1. При зміні значень будь – яких вихідних факторів є можливість отримання функціональної залежності напружень в характерних точках від зміни цього фактору. Визначення напруженого стану в точках масиву покриття від зміни декількох факторів потребує проведення факторних експериментів з об'єктивним вибором комбінацій значень необхідних параметрів.

**Таблиця 1** – Рівні змінних факторів та інтервали їх варіювання при дослідженні впливу навантажень від транспортних засобів на покриття

Незалежні змінні		Рівні варіювання			Інтервали варіювання $\Delta_i$
		Верхній +1	Основний	Нижній -	
$X_1$	$h$ , мм	90	80	70	10
$X_2$	$P$ , МПа	1,0	0,9	0,8	0,1
$X_3$	$E$ , МПа	7000	5500	4000	1500
$X_4$	$D$ , мм	360	330	300	30

В результаті можна отримати математичну модель (ММ) напружень в характерних точках покриття від зміни зовнішніх факторів виду:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

де  $y$  – функція відгуку, у даному випадку розтягуючи напруження  $\sigma$  у покритті мостового переходу;  $x$  – фактори, що впливають на напружений стан покриття.

Отримання моделі вказаного виду дозволить всебічно проаналізувати зміну напруженого стану покриття в характерних точках та в масиві в цілому при зміні значень вхідних параметрів. Це дасть змогу в кінцевому рахунку визначити раціональну комбінацію

tension) under other permanent conditions:  
 $X_1$  – pavement thickness,  $h$ , mm;  
 $X_2$  – pressure from vehicles over the pavement,  $P$ , МПа;  
 $X_3$  – pavement elasticity modulus,  $E$ , МПа;  
 $X_4$  – contact patch diameter,  $D$ , mm.

The levels of changeable factors and variability intervals have been chosen basing on the analysis of pavement types, their properties, loads and contact patches from vehicles, provided in (table. 1).

In case any background factors change there is an opportunity to get strain functional relation in the characteristic points caused by the change of this factor. The determination of tension state in the particular points of pavement under the change of several factors requires factorial experiments involving unbiased sampling of essentials value patterns.

**Table 1** – Levels of variables and intervals of variation in study the influence of stress on the vehicle to cover

Independent variables		Levels of variation			Varying intervals $\Delta_i$
		Upper +1	Main 0	Lower -1	
$X_1$	$h$ , мм	90	80	70	10
$X_2$	$P$ , МПа	1,0	0,9	0,8	0,1
$X_3$	$E$ , МПа	7000	5500	4000	1500
$X_4$	$D$ , мм	360	330	300	30

In the result we can get strain mathematical model (ММ) in the characteristic points of pavement depending on the change of external factors:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

where:  $y$  – is a response function, in this case spreading the tension  $\sigma$  over the overpass pavement;  $x$  – factors which have influence on the pavement tension state.

In case we get the model of the above mentioned type this will enable us to analyze across-the-board the change of pavement tension state both in particular points and in the massive as a whole under the change of initial parameters value. This will allow us in the long run to identify a

значень вхідних параметрів, які забезпечать мінімальні значення розтягуючих напружень та максимальну довговічність покриття.

Побудова математичних моделей напруженого стану покриття можлива лише на основі одержаних даних факторних експериментів, фізичних або чисельних. Зважаючи на те, що проведення фізичних експериментів є достатньо трудомістким, вартісним та тривалим у часі процесом, то більш раціональним є застосування для вирішення поставлених задач чисельних (комп'ютерних) експериментів.

Адекватність результатів чисельних експериментів в обов'язковому порядку має бути підтверджена фізичними експериментами. Вибір раціональних значень вихідних параметрів, що визначають розтягуючі напруження в покритті, може бути забезпечений плануванням експериментів.

Існує велика кількість варіантів планів проведення факторних експериментів [1, 6]. Із [2, 5] випливає, що оптимальними для вирішення поставлених задач є плани другого порядку.

Плани другого порядку квадратичних моделей, близькі до D-оптимальних типу  $B_n$ , знайшли найбільш широке використання, порівняно з ортогональними та рототабельними планами Бокса. Вони відрізняються від інших планів другого порядку меншою кількістю дослідів та можливістю отримання оцінки коефіцієнтів регресії з мінімальними дисперсіями.

Отже, для побудови математичної моделі (рівняння регресії) визначення напруженого стану покриття скористаємося повним факторним планом і планом типу  $B_n$  для квадратичних моделей.

При побудові плану повнофакторного експерименту для отримання математичних моделей, з варіюванням змінних факторів на двох рівнях, число необхідних експериментів рівне  $2^k$ , де  $k$  – кількість факторів. У разі переходу до планів типу  $B_n$  для квадратичних моделей кількість експериментів визначається. Таким чином, при визначенні напруженого стану покриття у даному дослідженні мінімальна кількість чисельних дослідів повинна складати  $2^4 = 16$  для ядра плану. У разі необхідності до плану додаються 8

reasonable pattern of initial parameters value which can provide minimum value of the tension stress and maximum pavement durability.

It is possible to construct mathematic models of the pavement tension state only basing on the

data received in the result of factorial experiment either physical or numerical. Taking account of the fact that physical experiments are rather expensive, time and labour consuming then it is more reasonable to carry on numerical (computer) experiments in order to achieve the objectives.

The faithfulness of such numerical experiments should be obligatory confirmed by physical experiments. The choice of initial parameters rational values determining pavement tension stress can be insured by the way of experiments planning. There is a huge number of options for the factorial experiment design [1, 6], [2, 5], having studied which we consider that the optimal one in order to achieve the objectives there is a second-order design.

Second-order quadratic model designs are similar to D-optimal type  $B_n$ , and are the most widely used comparing with orthogonal and rotatable Box design. They differ from other second-order designs by small number of experiments and the opportunity to get regression estimated coefficient with minimum dispersion.

Therefore in order to build a mathematic model (regression equation) for pavement tension state determination we will use a full factorial design and  $B_n$  type design for quadratic models.

At the construction of full factorial experiment design in order to receive mathematic models with variation of changeable factors at two levels, the number of the experiments required equals  $2^k$ , where  $k$  – is the number of factors. In case we use  $B_n$  type design for quadratic models the number of experiments is determined as follows  $2^k + 2k$ .

Consequently, the minimum number of numeric experiments at the determination of pavement tension state under this investigation should be  $2^4 = 16$  for design

зіркових точок. Побудова на емпіричному рівні [1, 9] математичної моделі типу [10], що описує залежність напружень в асфальтобетоні під дією транспорту з урахуванням факторів, які впливають на напружений стан покриття у відповідності з матрицею планування, дозволить знайти величини напружень у характерних точках і вирішити задачі вибору раціональних товщин покриття.

План виконання чисельного експерименту приведено в табл. 1.

Способом визначення коефіцієнтів математичної моделі є метод найменших квадратів (МНК), застосування якого обґрунтовано у [4].

Це значить, що вид моделі визначається наперед, оскільки структура «шуканої» емпіричної функції достеменно невідома. Підбір класу або типу функцій здійснюється на основі апріорної інформації [8]. Вибір типу ММ на початку дослідження базується на гіпотезі про лінійний вплив факторів  $x_i$  на величину функції відгуку, що вивчається. Математичні моделі, отримані за даними експериментів є емпіричними (статистичними).

Оскільки статистичні математичні моделі призначені не для опису механізму явища визначення напружень в асфальтобетоні, а для визначення поведінки системи, при виборі виду функції будемо виходити з принципу простоти [7]. Останньому найкраще відповідають поліноміальні моделі порядку  $m$ , які для  $k$ -змінних факторів записуються, як:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \dots + a_{12\dots k} x_1 x_2 \dots x_k + \zeta \quad (2)$$

де  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{inij}$  – коефіцієнти значущості поліноміальної моделі.

У математичну модель введений доданок  $\zeta$ , який відображає вплив випадкових факторів на результати розрахунку коефіцієнтів значущості моделі. Величина  $\zeta$  це похибка моделі або залишок. Ця величина випадкова, її математичне очікування дорівнює нулю, а дисперсія  $S_y^2 \neq 0$ .

Аналізуючи результати за такою моделлю має бути реалізований принцип відповідності або принцип адекватності моделі [7]. У разі неадекватності залежності (3), розглядається можливість побудови квадратичної моделі:

core. In case of necessity 8 star points should be added to the design.

Construction at empiric level [1, 9] of mathematic model type [10] describing the dependence of tension at asphalt-concrete under the influence of traffic taking account of factors which influence the pavement tension state in accordance with the planning matrix, will enable us to find stress rate in particular points and achieve the objectives як  $2^k + 2k$ . regarding the choice of rational pavement thickness.

The numeric experiment design is provided in (table. 1).

The way to determine mathematic model coefficients is the least squares method (LSM), the application of which is justified [4].

This means that the model type is determined beforehand as the structure of “desired” created function is not completely known. Selection of function class or type is made basing on aprior information [8]. The choice of type at the beginning of the investigation is based on the theory of  $x_i$  linear factor influence on the investigated response function value. Mathematic models received in the experiment result are empiric (statistical).

As statistical mathematic models are designed not for description of mechanism measuring the strain in the asphalt-concrete but for definition of system behavior, we will judge from simplicity principle when choosing the function type [7]. Polynomial models of  $m$  order correspond this principle the best and are written for  $k$ -variable factors as follows:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \dots + a_{12\dots k} x_1 x_2 \dots x_k + \zeta \quad (2)$$

where:  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{inij}$  – is polynomial models importance index.

Addendum  $\zeta$  reflecting the influence of chance factors on the results of model importance coefficient estimation has been introduced into the mathematic model.  $\zeta$  value is a model margin of error or excess. This value is randomized, its mathematical expectation equals zero and dispersion equals  $S_y^2 \neq 0$ .

In case we analyze the results using this model the conformity principle or model validity principle should be realized [7]. In



$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i=i+1}^k a_{ii} x_i x_n + \zeta \quad (3)$$

Розподіл полів деформацій в ортотропній плиті мостового переходу від дії транспорту. Для визначення напруженого стану покриття мостового переходу, відповідно до розрахункової схеми (рис. 2) та вихідних даних наведених в табл. 1 було виконано дослідження по визначенню НДС покриття методом скінченних елементів, за методологією наведеною в основних рівнях (1-3), з застосуванням програмного комплексу Ansys.

Типовий приклад розподілу полів деформацій у частині мостового переходу при транспортному навантаженні наведено на рис. 3. На основі отриманих результатів можна зробити висновок про те, що максимальні поля деформацій розповсюджуються в консольній частині споруди. Максимальні деформації складають 10,9 мм. Такі результати збігаються з даними, що отримані в результаті експериментальної перевірки деформацій в консольній частині моста від дії транспорту [1, 10]. Отримані дані складають 10 мм (див. рис. 3). Різниця не перевищує 9%, що може свідчити про достатньо високу збіжність результатів отриманих експериментально [1, 10] та на моделі.

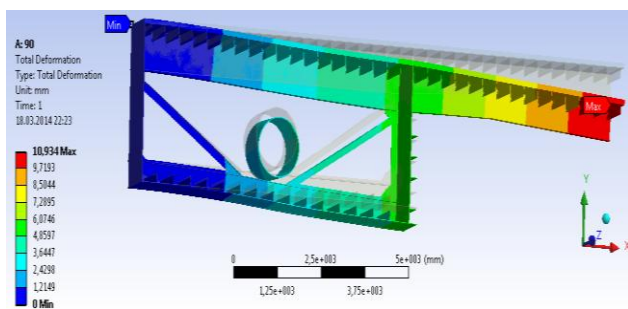


Рисунок 3 – Поля деформацій мостового переходу від дії коліс транспортних засобів

На рис. 4 показані результати еквівалентних напружень покриття та металоконструкції, яка відповідно має більш значний НДС. Еквівалентні напруження, в окремих місцях складають близько 80 МПа.

Напружено-деформований стан покриття мостового переходу в зоні контакту транспорту. Типові результати визначення нормальних розтягуючих напружень, що

case there is correspondence inadequacy we consider the opportunity to design a quadratic model:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{i=i+1}^k a_{ii} x_i x_n + \zeta \quad (3)$$

Deformation fields distribution in orthotropic slab of bridge crossing under action of traffic.

In order to measure pavement tension state of the bridge crossing in accordance with design model (Fig. 2.) and initial data provided in (table. 1).

The investigation has been carried out to estimate pavement stress-strain state using fine element method and methodology provided on the mail levels (1-3) with the application of Ansys bundled software.

Atypical example for deformation fields distribution in one of the bridge crossing sections under traffic load is provided at (Fig. 3). Basing on the results received we can conclude that maximum deformation fields are distributed in the cantilever arm of the structure. Peak strain makes 10.9mm. These results coincide with the data received in the result of the experimental test of deformation in the in the cantilever arm of the bridge under traffic load [1, 10]. The data received is 10mm (Fig. 3). The difference does not exceed 9% that can be indicative of the rather high reproducibility of the results received in experimental way [1, 10] and from the model.

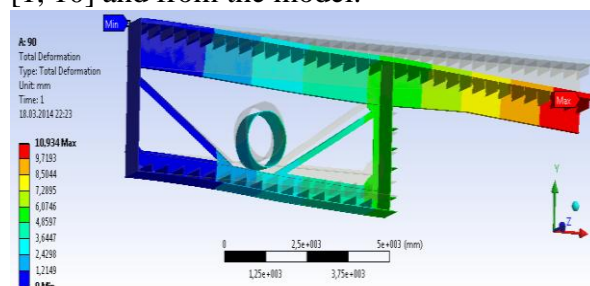
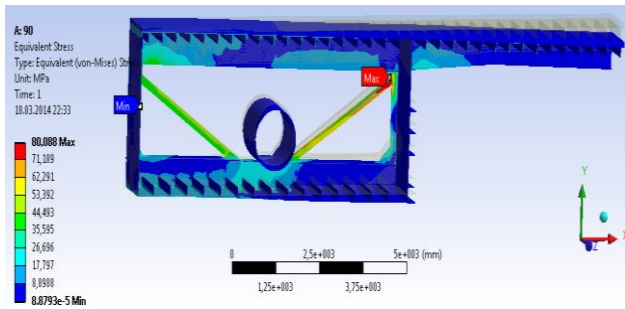


Figure 3 – Fields strain bridge from the action transport

The provided results (Fig. 4) of equivalent stress in the pavement and steelworks, which accordingly has more essential stress-strain state. Equivalent stress in some points make approximately 80 MPa.

Bridge crossing pavement stress-strain state in the traffic contact surface. The following stage of the investigation should measure stress-strain state in the traffic contact surface and

діють в покритті, яке розташоване на ортотропній плиті, відповідно до даних розрахункового положення №1 (табл. 2).



**Рисунок 4** – Результати розрахунку еквівалентних напружень в покриття та металоконструкції

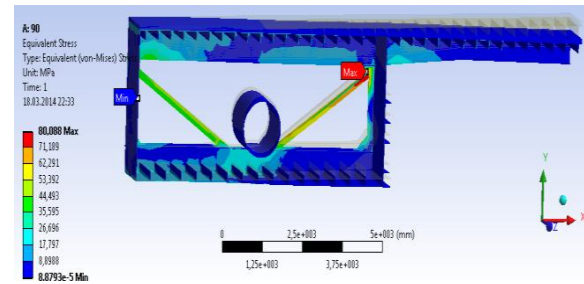
Найбільші значення розтягуючих напружень спостерігаються в консольній частині мостового переходу (для даного випадку 4,07 МПа, при товщині шару 90мм, тиску 0,8 МПа та модуля пружності матеріалу 7000 МПа), тому надалі будемо розглядати значення самого крайнього п'ятна контакту транспорту з покриттям на крайній правій полосі руху. Оцінка впливу факторів на зміну розтягуючих напружень в покритті моста в результаті дії на нього транспорту. Завданням є оцінити, які ж з вищенаведених факторів впливають на зміну розтягуючих напружень в покритті в результаті дії на нього транспорту. За отриманими результатами, застосувавши поліноміальну модель для 4-змінних факторів типу (3), було отримано рівняння регресії для визначення зміни розтягуючих напружень в верхніх шарах покриття мостового переходу:

$$\sigma_{\text{TP}} = 4,21 - 0,55 \cdot x_1 + 0,48 \cdot x_2 - 0,3 \cdot x_3 + 0,45 \cdot x_4 + 0,056 x_1^2 - 0,039 x_2^2 - 0,049 x_3^2 + 0,031 x_4^2. \quad (4)$$

Оскільки отримана математична модель є емпіричною (статистичною), це зумовлює обов'язкове виконання статистичного аналізу її результатів.

Правильна обробка та використання результатів чисельних експериментальних досліджень можливі тільки у випадку, коли дисперсії в кожній точці дослідження однакові (однорідні). Перевірка однорідності дисперсій виконується на основі [3].  
Перевірка закону розподілу

bridge crossing pavement (tabl. 2).



**Figure 4** – The results of calculation of equivalent stresses in pavements and metal

The typical results of normal tension stress measurement, acting in the pavement locating on the orthotropic slab, are in accordance with the design parameters.

The highest tension stress values are in the cantilever arm of the bridge crossing (in this case, 0,07 МПа, at the layer thickness 90mm, presser 0,8 МПа and material elasticity modulus 7000 МПа), for this reason we will further consider the farthest contact patch value of the traffic with pavement at the right outer lane.

Estimation of factors influence on the change of tension stress in the bridge pavement in the result of traffic impact. Our task is to estimate which of the above mentioned factors influence the change of tension stress in the pavement in the result of traffic impact.

On the base of the data received and having applied polynomial model for 4 variable factors type (3) we have received regression equation to measure the change of tension stress in the top layers of bridge crossing pavement:

$$\sigma_{\text{TP}} = 4,21 - 0,55 \cdot x_1 + 0,48 \cdot x_2 - 0,3 \cdot x_3 + 0,45 \cdot x_4 + 0,056 x_1^2 - 0,039 x_2^2 - 0,049 x_3^2 + 0,031 x_4^2. \quad (4)$$

As the received model is empiric one (statistical), this fact predetermines obligatory performance of its results statistical analysis.

The correct processing and application of the numerous experimental investigation results can be done only in case when variances in each investigation point are the same (homogeneous). The check of variances homogeneous is made on the base [3].



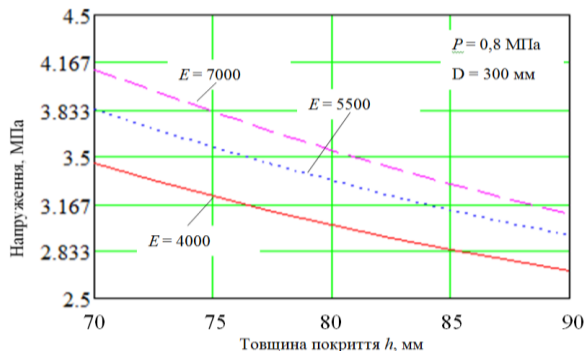
експериментальних значень в кожній серії повторних дослідів проводилась шляхом порівняння відношень дисперсій кожного планового досліду до сумарної дисперсії експерименту з табличним значенням Кохрена [7], при перевищенні значення якого експерименти, результати яких відповідають неоднорідним дисперсіям, повторювались заново, а в іншому випадку гіпотеза про однорідність дисперсій приймалась.

Перевірка дисперсій по критерію Кохрена полягає у наступному. Серед визначених оцінок дисперсій знайдено максимальну та визначено відношення найбільшої оцінки дисперсій до суми всіх оцінок дисперсій [1].

Аналіз ступеня впливу вихідних факторів  $X_1 \dots X_4$  та їх комбінацій на зміну значень нормальних розтягуючих напружень по осі  $OX$  в верхньому шарі покриття дозволяє зробити висновки про те, що серйозний вплив чинять: зменшення товщини покриття та модуля пружності покриття, а також зростання тиску від транспортних засобів та діаметра п'ятна контакту.

Нашим завданням стоїть визначити раціональні значення товщини покриття, аби значення нормальних розтягуючих напружень по осі  $OX$  в верхньому шарі покриття були допустимими та мінімальними.

За результатами виконаних чисельних досліджень наведемо графічні залежності зміни нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини шару  $h$ . На рис. рис. 5, рис. 6 побудована залежність нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини шару  $h$  при тиску на покриття 0,8 МПа та діаметрі контакту 300 мм.



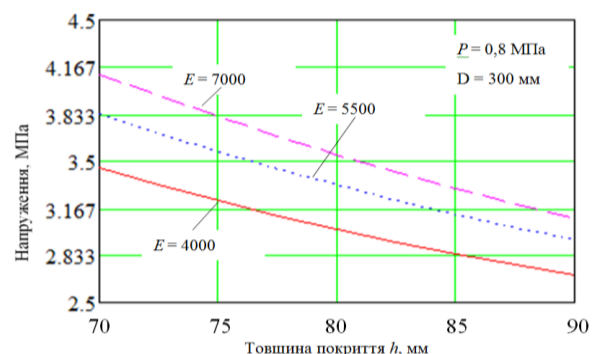
**Рисунок 5** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини шару  $h$

The check of test values distribution law in each series of replicated experiments was carried out by the way of variance ratio comparison in each planned experiment and summarized experiment variances with Cochren [7] tabulated point. In case the Cochren tabulated point is exceeded the experiments, results of which coincide with heterogeneous variances, were repeated again in other case the hypothesis of homogeneity of variances was accepted.

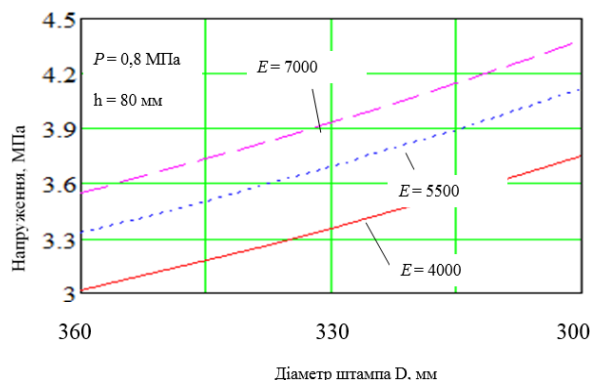
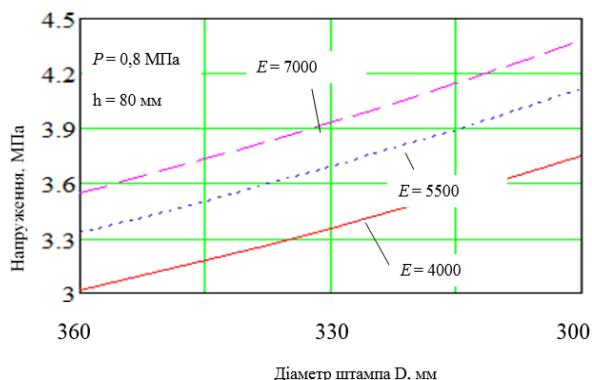
The variances check in accordance with Cochren's criterium is as follows. Among the variances definitive estimate the maximum value should be found and the ratio of the maximum variance estimate to the sum of all variance estimates is determined [1].

The analysis of the initial data  $X_1 \dots X_4$  and its combinations influence level on the change of normal tension stress values along the axis  $OX$  in the pavement top layer enable us to conclude that the decrease of pavement layer and pavement elasticity modulus as well as increase of presser from traffic and contact patch diameter seriously influence the process. Our task is to determine pavement thickness rational values in order for the normal tension stress values along the axis  $OX$  in the pavement top layer to be assumed and minimum.

Basing on the results of numerous experiments performed we provide a characteristic curve of the normal tension stress values change in the pavement under the condition of layer thickness change  $h$ . At (Fig. 5, Fig. 6) you can see a characteristic curve of the normal tension stress values in the pavement under the condition of layer thickness change  $h$  at the presser of 0,8MPa on the pavement and contact diameter 300mm.



**Figure 5** – Changing the normal tensile stresses in the pavement layer with the thickness  $h$



**Риснок 6** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні діаметра штампа  $D$

**Figure 6** – Changing the normal tensile stresses in the pavement by changing the diameter punch  $D$

Аналіз таких залежностей підтверджує прогноз про те, що збільшення товщини шару покриття призводить до зменшення розтягуючи напружень в ньому (рис. 7).

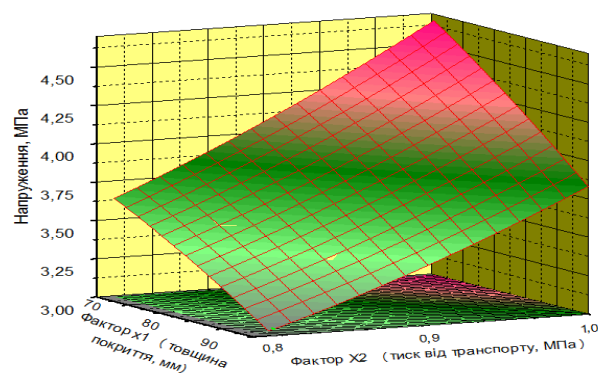
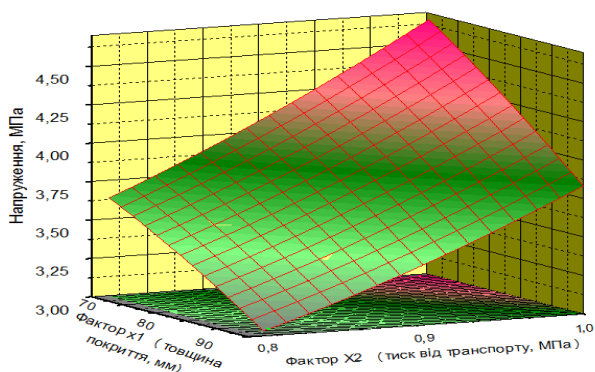
The analysis of such dependence confirms the assumptions that the increase in the pavement thickness layer causes the decrease of tension stress in it (Fig. 7).

Аналіз залежностей (рис. 8) дозволяє зробити висновок про те, що суттєвий вплив може чинити діаметр штампа. З його збільшенням розтягуючи напруження зростають від 3 МПа до 4 і більше, з урахуванням збільшення модуля пружності матеріалу.

The analysis of such dependence (Fig. 8) enables us to conclude that stamp diameter can seriously influence. As this stamp increases the tension stress increases as well from 3MPa to 4 and more, taking account of the material elasticity modulus increase.

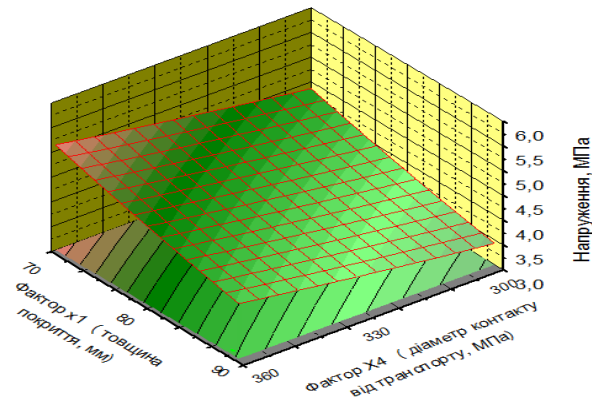
Окрім аналізу окремих факторів дії транспорту на зміну розтягуючи напружень, оцінимо комбінацію деяких факторів. На наш погляд, найбільш важливим є проаналізувати одночасний вплив  $X_1$  – товщини шару покриття,  $h$ , мм та  $X_4$  – діаметра штампу, при середніх значеннях тиску 0,8 МПа, та  $E = 5500$  МПа. Результати наведені на рис. 9, рис. 10.

Except for the analysis of separate factors of traffic influence on the change of tension stress, let us estimate the combination of some other factors. From our point of view the most important thing is to analyze the simultaneous influence of  $X_1$  – pavement layer thickness,  $h$ , mm and  $X_4$  – stamp diameter, under the average values of presser 0.8 MPa, and  $E = 5500$  MPa. The results are reflected at (Fig. 9, Fig. 10).

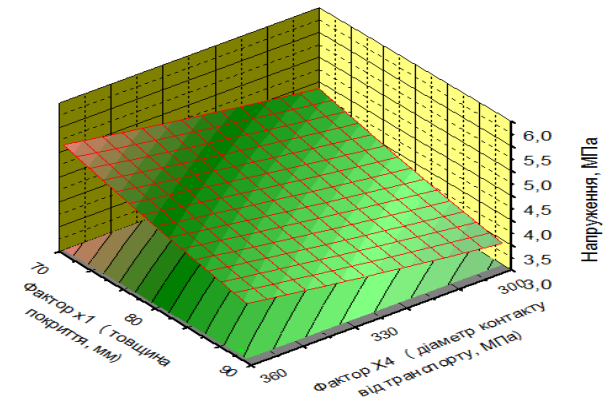


**Рисунок 7** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини шару  $h$  та тиску транспорту на поверхню

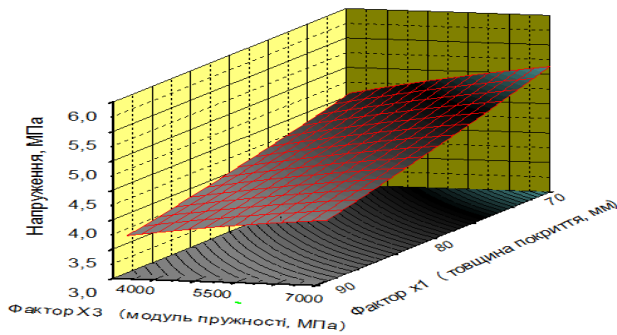
**Figure 7** – Changing the normal tensile stresses in the pavement layer  $h$  with the thickness  $h$  and transport to the surface pressure



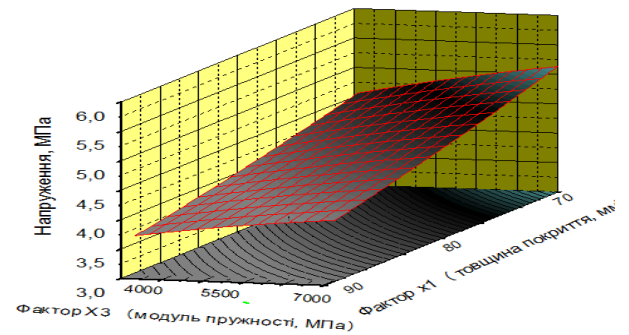
**Рисунок 8** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини покриття та діаметра штампа  $D$



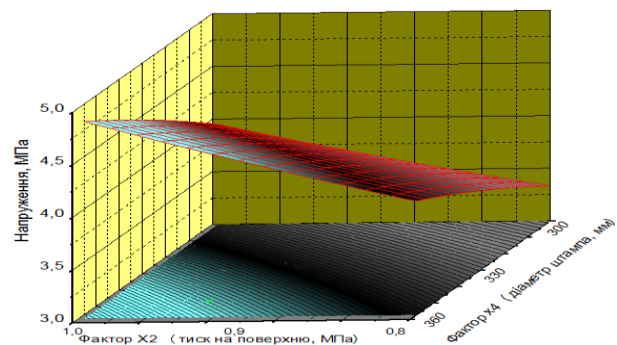
**Figure 8** – Changing the normal tensile stresses in the coating in the thickness of the pavement and the piston diameter  $D$



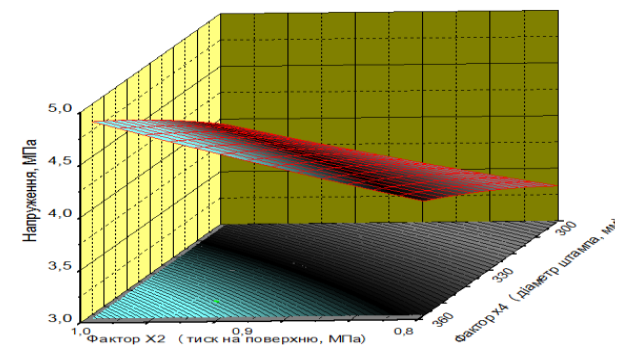
**Рисунок 9** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні товщини покриття та модуля пружності матеріала



**Figure 9** – Changing the normal tensile stresses in the pavement in the thickness of the pavement and elastic modulus of the material



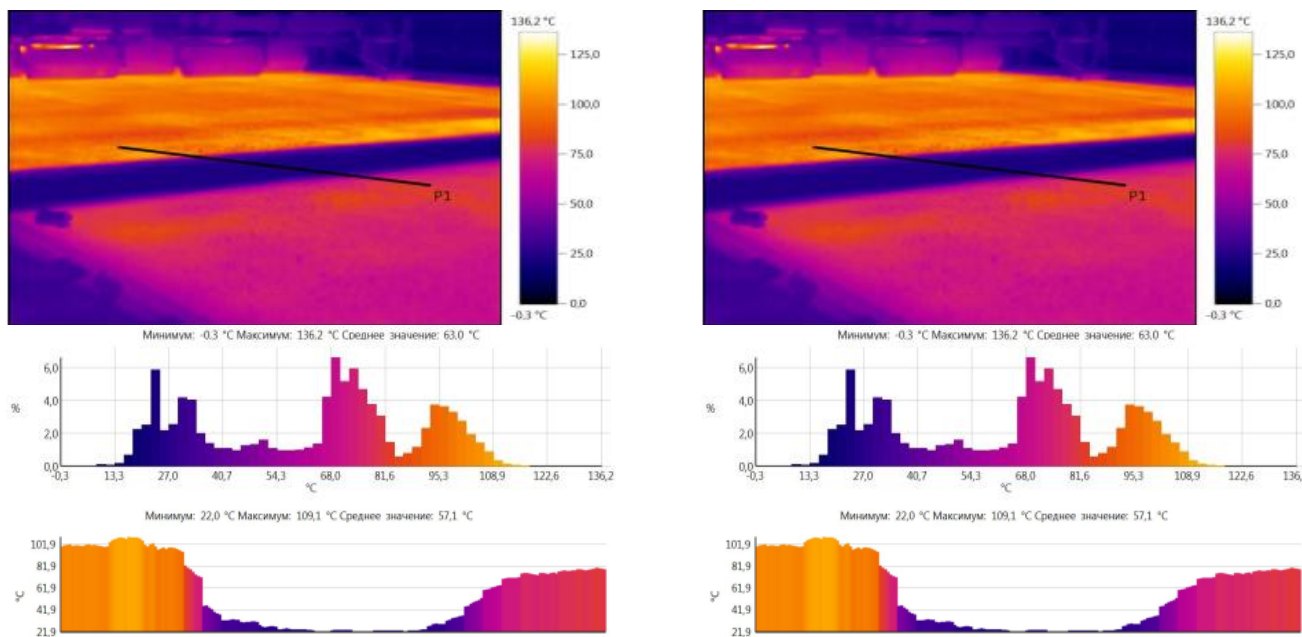
**Рисунок 10** – Зміна нормальних розтягуючих напружень в покритті при зміні тиску на покриття та діаметра штампа



**Figure 10** – Changing the normal tensile stresses in the pavement when the pressure to cover and piston diameter

Також проведено дослідження зміни температури асфальтобетонного покриття та ортотропної плити за допомогою тепловізійного обладнання. Результати досліджень зображено на рис. 11.

At the research changed temperature asphalt pavement and orthotropic slab with thermal imaging equipment. Results of research shown in (Fig. 11).



**Рисунок 11** – Зміна температури охолодження асфальтобетонного покриття на ортотропній плиті мостового переходу

**Figure 11** – Changing the cooling temperature of asphalt pavement on orthotropic slab bridge

### Висновок

Аналіз результатів досліджень дозволяє зробити висновки, що найменші значення розтягуючих напружень в покритті буде спостерігатись при товщині покриття 90 мм та діаметрі штамп 300 мм. При цьому напруження в покритті не перевищуватимуть 3,7 МПа.

### Conclusions

The analysis of the investigation results enables us to conclude that the minimum tension stress in the pavement will be at the pavement thickness 90mm and stamp diameter 300mm. under this condition the tension in the pavement will not exceed 3.7 MPa.

### Література

1. Онищенко А., Кузьмінець М., Редченко В., Тарнопольський Д., Аксьонов С. Експериментальні та теоретичні дослідження Південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві// Монографія К.: НТУ, 2014. – 341 с.
2. Бродский Б. Регрессионный анализ при композиционном планировании второго порядка специального вида. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», Информационные материалы // М.: АН СССР, 1970. – 145 с.
3. Барабашук В., Креденцер Б., Мирошниченко В. Планирование эксперимента в технике // К.: Техника, 1984. – 200 с.
4. Федоров Б. Теория оптимального эксперимента // – М.: Наука, 1971. – 214 с.
5. Андрукович П, Андрукович Т. Голикова П., Костина С., Планы второго порядка на

### References

1. Onishchenko A., Kuzminets M., Redchenko V., Tarnopolsky D., Aksenov S. Experimental and theoretical studies of the South bridge over the river Dnieper in Kiev // Monography K.: NTU 2014. – 341 p.
2. Brodsky B. Regression analysis when planning the composite second order of a special kind. Scientific Council on the Complex Problem "Cybernetics" Information materials// M.: AN SSSR, 1970. – 145 p.
3. Barabaschuk V., B. Kredentser, Miroshnichenko V. Experimental Design in Technology] // K.: Technics, 1984. – 200 p.
4. Fedorov B. The theory of optimal experiment // – M.: Science, 1971. – 214 p.
5. Andrukovich P, Andrukovich Tatyana Golikova, P., S. Kostin Plans second order

гиперкубе, близкие по свойствам к оптимальным. Новые идеи в планировании эксперимента. // – М. : Наука, 1969. – 112 с.

6. Голикова Т., Панченко М., Фридман З. Каталог планов второго порядка // М.: Изд-во МГУ, 1974. – 109 с.

7. Larry J. Segerling. Applied Finite Element Analysis // Jon Wiley and Sons, Ins. New York//London//Sydney//Toronto. 1976. – 195 p.

8. Адлер Ю., Грановский Ю. Методология и практика планирования эксперимента за десять лет // Заводск. лаб. – 1977. – С. 53–59.

9. Киселев В. Исследование деформированного состояния двухсвязных пологих оболочек на основе методов теории планирования эксперимента / Киселев В., Макий Ю., Сопротивление материалов и теория сооружений. // Вып. № 42. – 1983.

10. Онищенко А., Кузьмінець М., Прикладовський В., Різніченко О., Аксьонов С. Обґрунтування конструкції дорожнього одягу з асфальтобетону литого Гусасфальт підвищеної тріщиностійкості та колієстійкості для металеві прогонової будови південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві //Наукові нотатки – Луцьк, 2014. – Вип.№ 45. – С. 396-406.

on the hypercube, with similar properties to the optimum. New ideas in the planning of the experiment] // – М. : Science, 1969. – 112 p.

6. Golikova T., M. Panchenko, Z. Friedman plans second-order catalog// M.: Publishing office MGU, 1974. – 109 p.

7. Larry J. Segerling. Applied Finite Element Analysis // Jon Wiley and Sons, Ins. New York//London//Sydney//Toronto. 1976. – 195 p.

8. Adler Y. Hranovskyy Y. Methodology and Practice Scheduling experiment ten years // Factory Reset. lab. – 1977. – P. 53–59.

9. Kiselev V. Investigation deformatyrovannoho STATUS shallow shells methods based on the theory experiment Scheduling, Kiselev V., Maki Y., Resistance of materials and structures Theory]// Ed. № 42. – 1983.

10. Onishchenko A, Kuzminets M., Prykladovskyy V., Riznichenko O. Aksenov S. Rationale construction of asphalt concrete pavement cast Husasfalt high fracture toughness and rutting firmness for metal span south bridge over the river Dnieper in Kiev// Scientific notes – Lutsk, 2014. – Ed.№ 45. – P. 396-406.

**Рецензенти:**

Жданюк В.К., д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.  
Савенко В.Я., д-р тех. наук, Національний транспортний університет.

**Reviewers:**

Zhdaniuk V.K., Dr. Tech. Sci., Kharkiv National Automobile and Highway University.  
Savenko V.Ya., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: 26.10.2016 р.