

УДК 625.7/.8

Гамеляк І.П., д-р техн. наук, Карафізі Л.М.

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПОКРИТТІВ ІЗ КАМ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БРУКУВАННЯ

**Анотація.** Розглядаються дослідження та методи розрахунку, які дають можливість проектувати конструкції дорожніх одягів з покриттями із елементів брукування.

**Ключові слова:** блокові покриття, вертикальні напруження стиску, елемент брукування, дискретне середовище.

**Аннотация.** Рассматриваются исследования и методы расчета, позволяющие проектировать конструкции дорожных одежд с покрытиями из элементов мощения.

**Ключевые слова:** блочные покрытия, вертикальные напряжения сжатия, элемент мощения, дискретная среда.

**Annotation.** We consider the researches and the calculation methods that enable to design the pavement constructions of paving elements.

**Key words:** block pavements, compressive stresses, paving element, discrete environment.

### Вступ

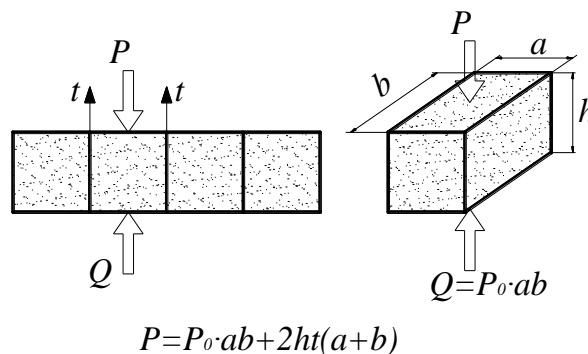
Для забезпечення надійності покриттів із елементів брукування необхідно розробити достовірний метод розрахунку конструкцій даного типу.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є аналіз робіт, що проводилися в різні періоди, задля можливості проектування покриттів із кам'яних елементів брукування з необхідними експлуатаційними показниками.

**Огляд досліджень.** Під блочним покриттям пропонується приймати такий вид покриття, що складається з елементів брукування, горизонтальні розміри котрих є меншими від розміру сліду прикладеного навантаження (діаметра кола, рівновеликого сліду колеса розрахункового автомобіля), а їх висота дозволяє їм працювати переважно на стиснення.

В 60-тих роках минулого століття професором Теренецьким К.С. в КАДІ [1], був запропонований метод розрахунку дорожніх одягів як дискретного середовища, який дає можливість розрахунку найбільш масових видів дорожніх одягів в тому числі блочних покриттів з елементів брукування.

Схему розрахунку блочних покриттів наведено на рис. 1. Підстилаюче середовище розглядається із умов рівноваги системи, яка займає проміжне місце між двома ідеальними крайніми системами: найбільш щільно складена система призматичних брусків і така ж система куль. Дійсна форма зерен в покритті лежить між цими крайніми формами і наближається то до однієї, то до іншої. Найбільш щільне укладення припускає при цьому пошарове рядове розташування зерен.

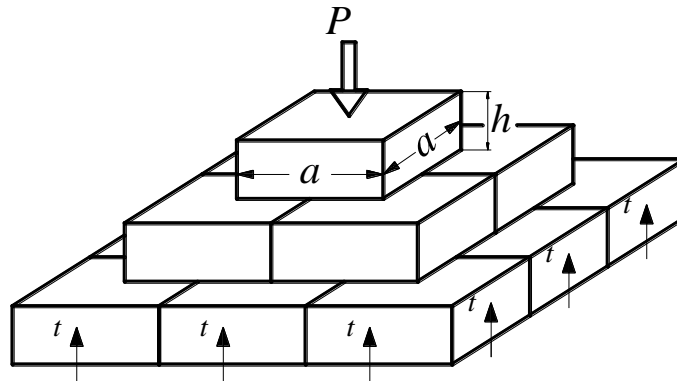


**Рисунок 1** – Схема розрахунку блочного покриття

Розглядається найпростіша схема безрозпірної конструкції одягу, що складається з найбільш щільно складених призматичних елементів (рис. 2) з передачею поверхневого тиску через один елемент [1]. Передача тиску в наступному шарі відбувається на чотири елементи, у третьому на 9 і т. д. Для даної схеми при передачі тиску через  $m \cdot n$  зерен на поверхні отримано загальний вираз визначення вертикальних напружень:

$$\sigma_{zN} = \frac{mnP - 2N(N + m + n - 1)ah}{(m + N - 1)(n + N - 1)a^2}, \quad (1)$$

де  $m \cdot n$  – кількість зерен на поверхні через які передається тиск;  $P$  - прикладене навантаження;  $N=H/h$ ,  $H$  – товщина покриття до розрахункового шару,  $h$  – висота елемента, тобто висота ряду;  $a$  – горизонтальний розмір елемента;  $t$  – опір зрізу в тілі шару.



**Рисунок 2** – Схема безрозпiрного середовища, що складається з щiльно складених призматичних елементiв з ребром ( $a$ ) та висотою ( $h$ )

Через нерiвномiрний розподiл тиску в кожному шарi найбільший тиск по осi приймається рiвним подвiйному - середньому в даному шарi.

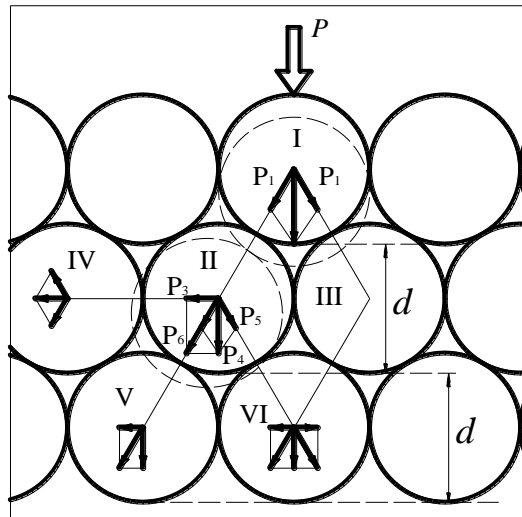
$\sigma_{zmax} = 2\sigma_{zN-1}$  – при передачi тиску не менше нiж через 3 зерна. При передачi через одне або 2 зерна –  $\sigma_{zmax} = \sigma_{zN}$  (формула 1).

Властивiстю цiєї схеми рiвноваги є те, що розподiльча здатнiсть покриття посилюється iз зменшенням спiввiдношення  $h:a$ . При цьому зростає  $N$  i  $ha < a^2$ , але  $ha$  впливає на  $P$  менше, нiж  $N$ .

Тому, плоска форма призматичних елементiв є вигiднiшою вiд кубiчної.

Збiльшення висоти елемента в порiвняннi з його довжиною (i шириною) значно знижує розподiльчу здатнiсть покриття, тому що  $N$  зменшується, а  $ha > a^2$ . Найбiльш невигiдною розподiльчою здатнiстю вiдрiзняються одноряднi покриття типу брукiвок, найбiльш вигiдними є покриття з дещо плоскими щибiнками при недопущеннi елементiв, що стирчать.

iнша крайня система передбачає, що одяг складається з елементiв, котрi мають форму кулi. Рiвновага покриття iз кулеподiбних зерен розглядається на рис. 3.



**Рисунок 3** – Схема середовища, що складається з щільно складених кульових елементів з діаметром ( $D$ )

Зерно I ряду стискається силою  $P$  і прагне вдавнити і розсунути кулі II і III (пунктир на рисунку). У точках контакту цей тиск передається другому ряду з силою  $P_1$  на кожне зерно, що діє під кутом  $\alpha$  до вертикалі і прагне розсунути кулі IV, V, VI [1]. При цьому,  $\frac{P}{2} = P_1 \cdot \cos \alpha$  звідки слідує  $P_1 = \frac{P}{2 \cos \alpha}$ . У центрі зерна другого ряду ця сила, розкладаючись, дає горизонтальну, складову  $P_3 = P_1 \cos(90^\circ - \alpha) = P_1 \sin \alpha$ , що відсовує зерно IV і вертикальну  $P_4$ , яка стискає зерно.  $P_4 = P_1 \cos \alpha = \frac{P}{2}$ , яка розсовує кулі V та VI.

Таким чином, у цій системі з'являються, крім вертикальних сил, що стискають зерно, ще й горизонтальні, які прагнуть розсунути зерна. Сили останнього виду діють на сусідні ненавантажені зерна за тією ж схемою, що і розглядувані вертикальні складові в межах завантаженої частини. При подальшому розгляді, горизонтальні сили дають складові, спрямовані вгору, що призводять, в решті-решт, до відомого явища дилатансії зернистого матеріалу або ґрунту в околицях дії стискаючого штамп.

Ця категорія сил не розглядається в подальшому, тому що для розрахункових цілей є цікавою тільки стискаюча частина сил у зоні найбільших тисків, тобто поблизу осі стиснення.

Взаємодія зерен одне з одним змінюється, однак, за рахунок наявності опору сколюванню, який проявляється по зовнішнім граням піраміди продавлювання, за аналогією з тим же явищем, що має місце в розглянутій вище піраміді для системи складеної з призматичних елементів.

За аналогією з цією схемою можна з деяким наближенням написати для шару на глибині  $H=Nd$ :

$$\sigma_{zN} = \frac{PM_0 - (a+b)\pi d^2 Nt}{\frac{\pi D^2}{4} M_N},$$

або з подальшим наближенням:

$$\sigma_{zN} = \frac{PM_0 - (a+b)\pi d^2 Nt}{0,75D^2 M_N}, \quad (2)$$

де  $a, b$  – кількість зерен в середньому ряду завантаженої піраміди;  $M_0$  – кількість зерен, через які передається тиск на поверхню;  $d$  – урізаний діаметр зерна,  $d=0,85D$ ;  $D$  – повний діаметр зерна;  $M_N$  – кількість зерен в ряду на глибині  $H = Nd$ ;  $N$  – кількість рядів зерен від поверхні до даного шару.

Для вирішення цього виразу потрібно знати загальну кількість зерен в межах піраміди тиску  $\Sigma M_i^N$  (щоб знайти  $ab$ ) і кількість зерен в шарі на глибині  $H=Nd$ .

Дійсні значення напружень повинні лежати між знайденими крайніми їх значеннями, визначеними за формулою 1 і 2, або за однією з них, якщо форма зерна є кульова або призматична.

Так, для порівняння наведемо формулу розподілу вертикальних напружень стиску, отриману І.І. Кандауровим для зернистих середовищ [2]:

$$\sigma_z = \frac{P}{2\pi\nu z^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\nu z^2}\right), \quad (3)$$

де

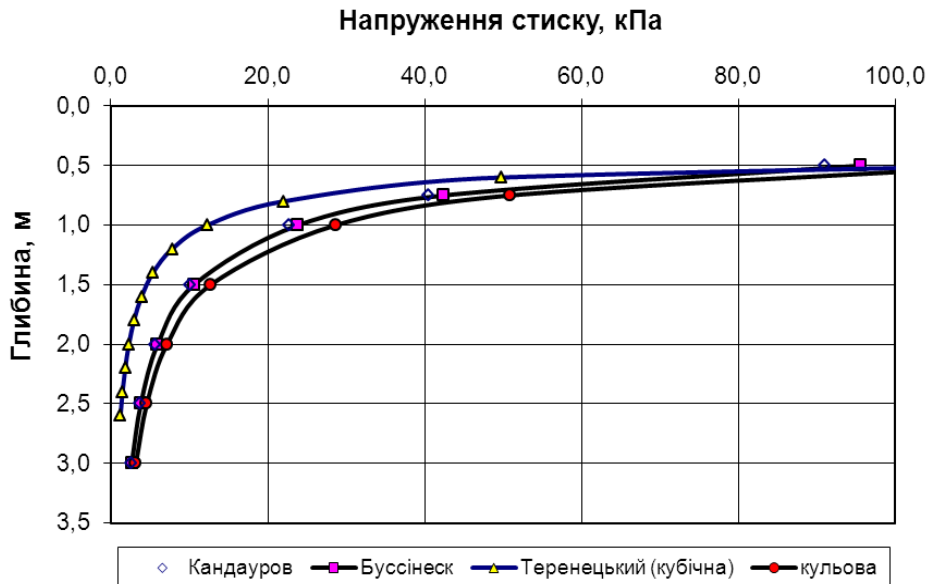
$$r^2 = x^2 + y^2$$

$\nu$  – коефіцієнт розподільчої здатності середовища, приймається рівним 0,35;  $x, y, z$  – координати.

В механіці ґрунтів найбільш широко використовується формула Буссінеска для розрахунку вертикальних напружень стиску у пружному напівпросторі [3]:

$$\sigma_z = \frac{P}{z^2} \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}}, \quad (4)$$

Графічне порівняння результатів розрахунків за приведеними вище формулами наведено на рисунку 4.



**Рисунок 4** - Аналіз зміни вертикальних нормальних напружень за різними залежностями

Аналіз зміни вертикальних нормальних напружень за різними залежностями вказує, що напруження за формулами І.І. Кандаурова та Буссінеска практично співпадають і є проміжними між значеннями напружень для кубічної та кулеподібної форми зерен (рішення Теренецького).

Однорядні системи, до яких відносяться блокові конструкції (бруківки) дискретного типу, тобто неомонолічені заповнювачем швів, розраховуються за формулою (5), спрощеної для польових умов [4]:

$$P = \sigma_{cp} \omega + Uht$$

і далі:

$$P \approx 0,7E_0 w \sqrt{\omega} + Uht, \quad (5)$$

де  $P$  – допустиме навантаження на колесо автомобіля, що передається через блок, з площею лицьової поверхні  $\omega$ ;  $E_0$  – еквівалентний модуль системи, що підстиляє покриття (основа плюс ґрунт);  $0,7$  – нормуючий коефіцієнт умов роботи;  $\sigma_{cp}$  – середнє вертикальне напруження по підошві елемента брукування в межах штампа;  $w$  – допустиме осідання покриття при його прогині під навантаженням;  $U$  – параметр лицьової поверхні блоків, що сприймають тиск;  $h$  – висота елемента брукування;  $t$  – питомий опір вертикальному зусиллю, необхідного для висмикування елемента брукованого покриття.

Цей опір для брукованих покриттів елементів правильної форми (рядової кладки) може бути розрахований за формулою Кулона;

$$t = fq + c = fE(\varepsilon) + c = fE \frac{\Delta l}{na} + c, \quad (6)$$

де  $f$  – кут внутрішнього тертя і  $c$  – питоме зчеплення у швах блочного покриття.

$\Delta l$  – скорочення довжини поперечника в результаті будівельного або в подальшому експлуатаційного укочування транспортом;

$a$  – ширина шва;

$n$  – кількість швів у поперечнику.

У такому розумінні  $t$  – це структурна характеристика даної дискретної будови.

Наведені залежності не отримали поширення в практиці проектування покриттів із елементів брукування через відсутність значень окремих параметрів та експериментальної перевірки.

За кордоном з середини 80-х років минулого століття спостерігається відновлення зацікавленості до проектування і будівництва покриттів із елементів брукування [5]. Так в 1988 році був представлений універсальний голландський метод проектування блочних покриттів з піщаними підстиляючими шарами [6]. Метод ґрунтується головним чином на визначенні механічного розвитку колії. Для цього підходу потрібно знати механічні властивості всіх матеріалів, що використовуються в основі. Тому рівняння, що описують механічні властивості матеріалів, включені як функції від складу матеріалу, форми зерен і ущільнюваності, що виведені шляхом регресійного аналізу.

В цьому методі для оцінки підстилаючих шарів з незв'язних матеріалів використовуються наступні критерії: а) міцність; б) пружна поведінка; в) залишкова деформація.

Послідовність конструювання заключається в наступному. Спочатку визначаються властивості пісків основи, а саме: кут внутрішнього тертя ( $\varphi$ ), питома зчеплення ( $c$ ), середній розмір зерен ( $d_{50}$ ), коефіцієнт однорідності ( $C_u=d_{60}/d_{10}$ ), форма зерен ( $VVS$ ), ступінь ущільнення ( $DOC$ ). На основі даних властивостей та певних параметрів (частина з яких встановлена емпіричним шляхом для матеріалів, що застосовуються в Голландії, а інша частина розраховується виходячи з їх властивостей), визначаються міцність піску, пружна поведінка та залишкова деформація.

*Міцність* незв'язаних матеріалів оцінюється за критерієм Кулона-Мора:

$$\sigma_{1,f} = \frac{(1 + \sin \varphi) \cdot \sigma_{conf} + 2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{1,f}$  - перше головне напруження при руйнуванні (кПа);  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя (град);  $\sigma_{conf}$  - утримуючий тиск (кПа);  $c$  - питома зчеплення (кПа).

На основі (7) може бути визначене співвідношення напружень  $\sigma_1/\sigma_{1,f}$ . Це співвідношення напружень збільшується зі зростанням завантаження матеріалу і досягає значення 1 при руйнуванні.

*Пружна поведінка.* Щоб дати належний опис визначенню модуля пружності для пісків в залежності від напруження запропоновано наступне рівняння:

$$M_r = k_1 \left( \frac{\sigma_{conf}}{\sigma_0} \right)^{k_2} \left( 1 - k_3 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,f}} \right)^{k_4} \right), \quad (8)$$

де  $M_r$  - модуль пружності (МПа);  $\sigma_{conf}$  - утримуючий тиск (кПа);  $\sigma_0$  - характеризує напруження від 1 (кПа);  $\sigma_1/\sigma_{1,f}$  - співвідношення напружень(-);  $k_1$  - параметр моделі (МПа);  $k_2, k_3, k_4$  - параметри моделі (-).

*Залишкова деформація.* Розвиток залишкової деформації в пісках визначається за формулою:



$$\varepsilon_{perm} = A \left( \frac{N}{1000} \right)^B \quad \text{з} \quad A = a_1 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,f}} \right)^{a_2} \quad \text{і} \quad B = b_1 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,f}} \right)^{b_2}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{perm}$  - залишкова деформація (%);  $a_1$  - параметр моделі (%);  $a_2, b_1, b_2$  - параметри моделі (-).

*Характеристика шару з блоків.* Для розрахунку шару з блочних елементів розробили модель з використанням методу скінченних елементів (МСК), в якій розраховували жорсткість стандартного шару. Даний шар складається з прямокутних блоків товщиною 80 мм та горизонтальними розмірами 211 мм x 105 мм (що означає, те що в одному м<sup>2</sup> знаходиться до 44 блоків вважаючи ширину швів рівною 2,5 мм). Ці блоки взаємопов'язані дотичними і нормальними силами, що являють собою шви між блоками.

Вплив інших типів блоків на структурну поведінку блочних покриттів включений на основі механічного аналізу властивостей цементобетонного шару. На основі цього аналізу механічні властивості будь-якого цементобетонного шару з прямокутних блоків можуть бути перетворені в еквівалентні сумісні властивості для цементобетонного шару з стандартних блоків завтовшки 80 мм. Цей аналіз привів до отримання наступного рівняння для еквівалентної сумісної нормальної жорсткості (аналогічне рівняння виведене для еквівалентної сумісної зсувуючої жорсткості).

$$k_{n,eq} = \frac{44}{n} \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{h}{2w_j} \left( \frac{h}{80} \right)^2, \quad (10)$$

де  $k_{n,eq}$  - еквівалентне сумісне нормальне зусилля жорсткості для структурної моделі, що моделюється на мм довжини шва (Н/мм);  $n$  - кількість блоків на м<sup>2</sup> (-);  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона матеріалу шва (-);  $E$  - модуль Юнга матеріалу шва (МПа);  $h$  - товщина блоку (мм);  $w_j$  - ширина шва (мм).

Значення  $k_{n,eq}$  змінювалося від 400 до 40500 Н/мм<sup>2</sup>. Малі значення є результатом великої ширини шва, невеликого розміру блоків, тонких блоків, слабких матеріалів шва або поєднання даних факторів.

Результат кожного індивідуального розрахунку дає поперечний профіль колії, як функцію від кількості прикладань навантаження. В результаті глибина колії по середині сліду колеса знаходиться за допомогою рівняння 11.

Ця формула майже досконало відповідає розвитку колії в практиці завдяки розрахунковим даним і таким чином діє тільки при умові якісної та точної бази вихідних даних.

$$RD = a_c \cdot \left( \frac{N}{1000} \right)^{b_c} \quad (11)$$

де  $a_c$  - глибина колії після прикладання 1000 осьових навантажень (мм);  
 $b_c$  - швидкість розвитку глибини колії в логарифмічному масштабі (-).

Для того, щоб прийти до методу проектування, який включає стандарт нежорсткого критерію глибини колії  $a_c$  і  $b_c$ , розроблені рівняння, що описують значення  $a_c$  і  $b_c$  як функцію від:

- властивостей шару блоків, тобто еквівалентної сумісної жорсткості  $k_{n,eq}$ ;
- товщини підстилаючого шару  $H$ ;
- міцності піску підстилаючого шару, тобто  $c$  і  $\varphi$ ;
- жорсткості піску підстилаючого шару, тобто  $k_1$  і  $k_2$ ;
- жорсткості земляного полотна;
- завантаження покриття, тобто осьового навантаження і відхилення дорожнього руху.

Цей метод широко використовується при проектуванні міських вулиць та доріг в Нідерландах.

В опублікованих дослідженнях [7] Муратом Альгіним в 2007 році зазначається, що розвиток напружень під бруківкою відрізняється від розподілу напружень в звичайних конструкціях нежорсткого типу. В статті показана зміна кутових напружень у випадку прямокутних блочних елементів з розмірами 100x200 мм. Максимальне напруження під навантаженим слідом в 0,8 Н/мм<sup>2</sup> становить 1,15 Н/мм<sup>2</sup> тобто має місце 45% перенапруження, коли тільки один кут бруківки дає позитивні напруження стиснення. Рис. 7 показує схему напружень які розвиваються в підстилаючому піску коли транспортний засіб рухається по прямокутній бруківці укладеній за схемою ялинки.

Причина, чому в деяких випадках напруження в підстилаючих пісках насправді є вищими ніж на поверхні покриття пов'язана з ексцентриситетом і величиною поверхні сліду прикладеного навантаження до бруківки.

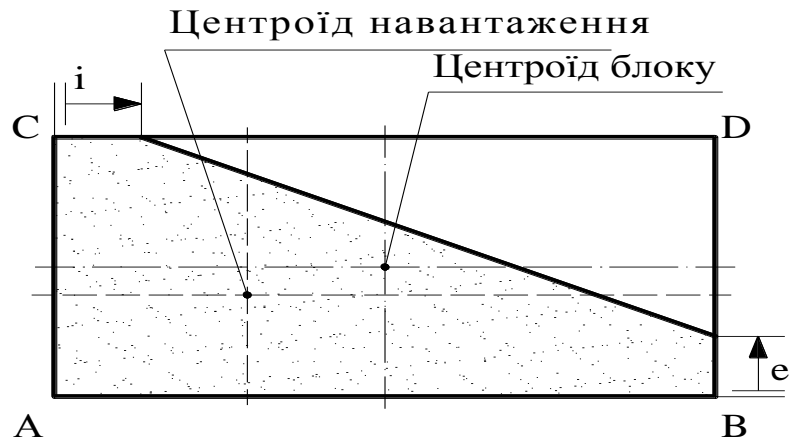
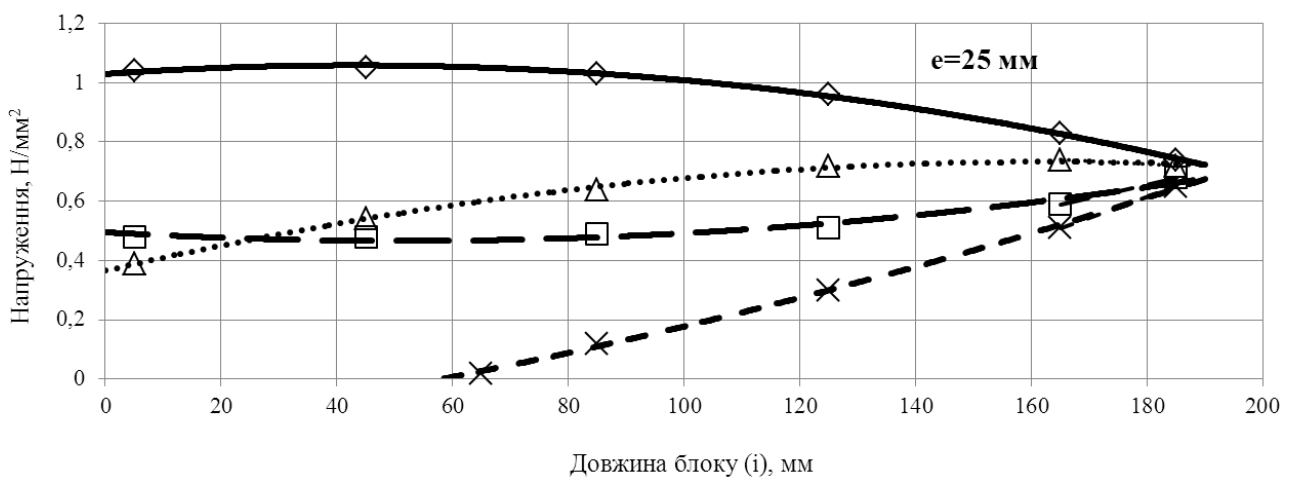
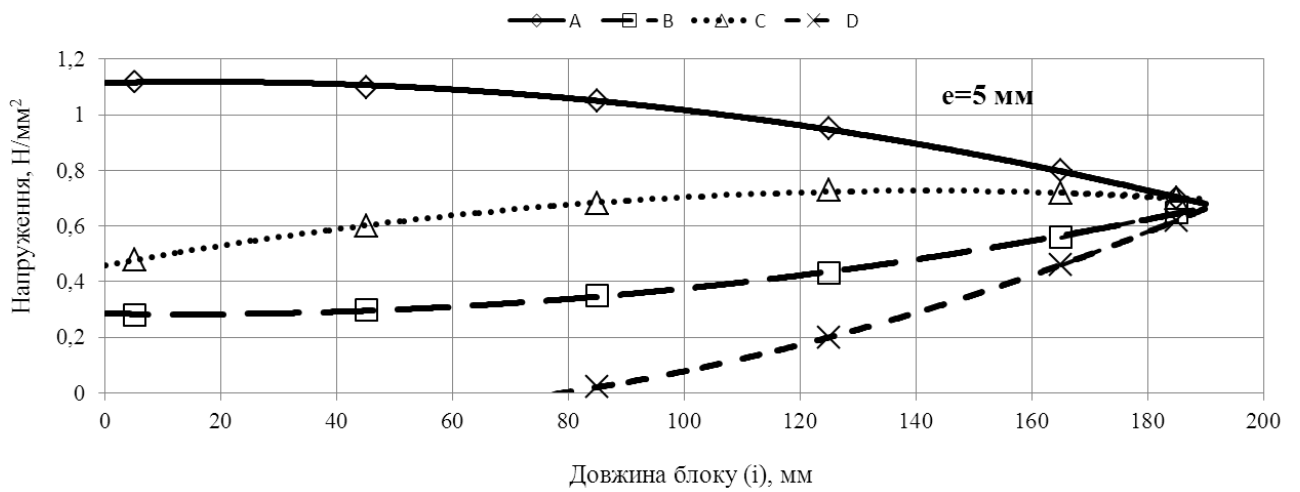
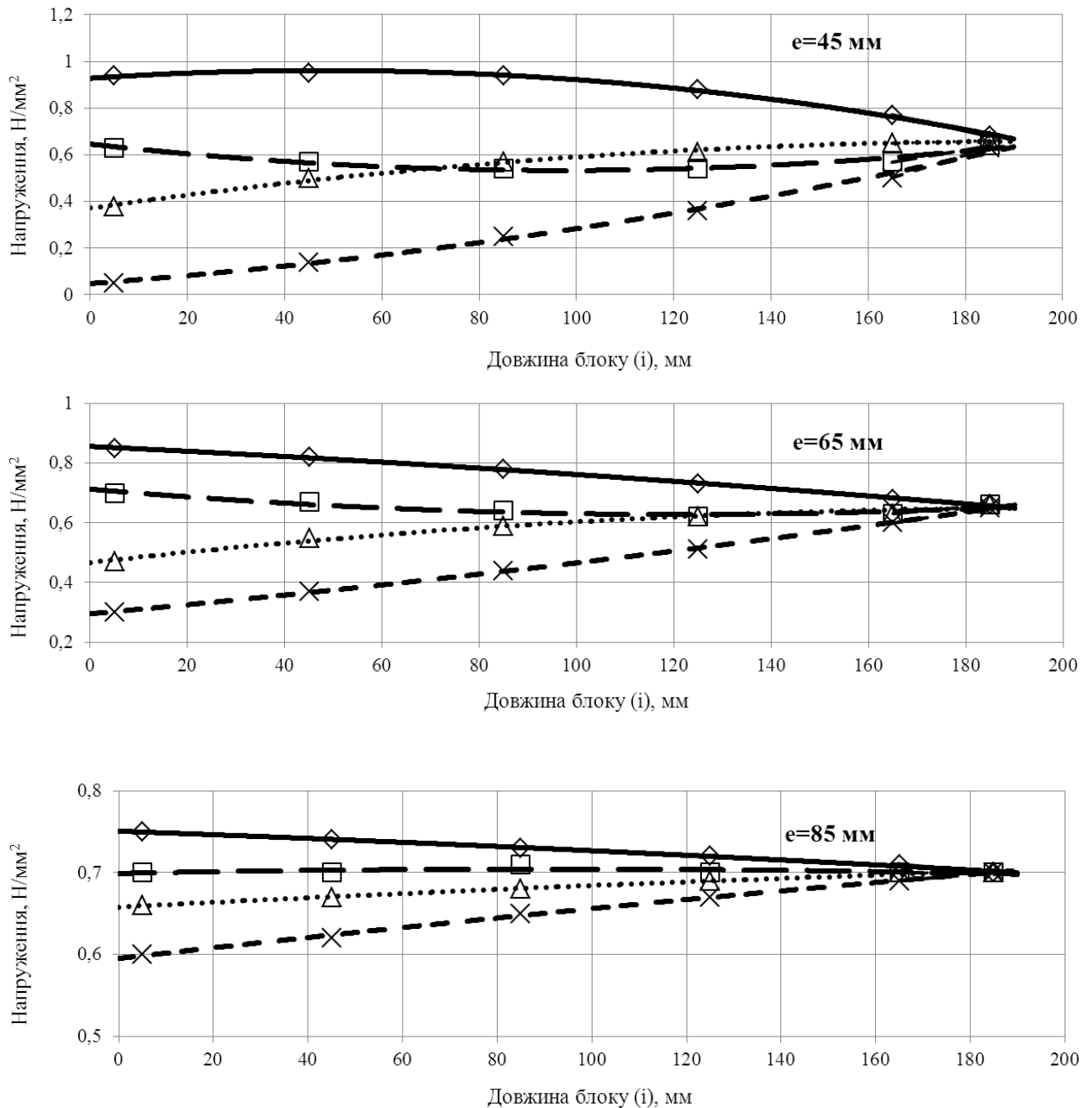


Рисунок 6 - Схематичне зображення блоку та прикладеного навантаження





**Рисунок 7** - Значення напружень в підстилаючому піску під чотирма кутами скошеної прямокутної бруківки з розмірами 200x100мм для слідів навантаження, що змінюють свою форму

### Висновки

На сьогоднішній день в Україні відсутній метод розрахунку дорожнього одягу з блочними покриттями, що не дає можливості забезпечити необхідної надійності відповідних конструкцій. Тому розробка даного методу є

актуальною задачею. Розглянувши наведені роботи можна зробити наступні висновки:

- метод розрахунку, який запропонував професор Теренецький не перевірений практичними дослідженнями;

- голландський метод містить велику кількість параметрів, які визначені наближено лише для матеріалів, що містяться в Голландії;

- необхідно упевнитися у появі перенапружень під елементами брукування, і уточнити їх значення для різних розмірів і форм блоків, та від дії транспортних засобів, що рухаються з різними швидкостями.

### Література

1. Теренецький К.С. Нежесткие дорожные покрытия, как распределяющая среда. Труды Саратовского автомобильно-дорожного института, сборник 9, 1948. – С.13 - 40.
2. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.: Стройиздат, 1988. – 28 с.
3. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Т. 1. Л.: Госстройиздат, 1959. – 121 с.
4. Теренецький К.С. Материали Всесоюзної міжвузовської науково-технічної конференції по прочності дорожніх одежд. Харків, 1968. – С. 34 - 39.
5. Гамеляк І.П., Карафізі Л.М. Проблеми і перспективи влаштування покриттів із блоків мощення. - Автомоб. дороги і дорожнє будівництво. - К.: НТУ, Випуск 80, Науково – технічний збірник, 2011. – С. 59 – 70.
6. Huurman, M. Houben, L.J.M., Geense, C.W.A. and J.J.M. van der Vring. The upgraded dutch design method for concrete block road pavements. The 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, South Africa. Pave 2003. – 20 p.
7. Halil Murat Algin. Interlock mechanism of concrete block pavements. Journal of transportation engineering © ASCE/May 2007. – PP. 318 - 326.