https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.159

УДК 625.8

Соколов О. В., *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна

ПІДБІР ОПТИМАЛЬНИХ ЗЕРНОВИХ СКЛАДІВ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ У СЕРЕДОВИЩІ MS EXCEL

Анотація

Вступ. Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (далі – АС) передбачає розрахунок таких його параметрів, які, у тому числі, задовольняють вимогам табл. 6 і табл. 7 ДСТУ Б В.2.7-119 [1].

Вибір складу заповнювача та вмісту в'яжучого АС, яка відповідає вимогам специфікації, є тривалою процедурою спроб і помилок, а успіх у проєктуванні АС значною мірою залежить від досвіду проєктувальника. Подоланню цього утруднення може сприяти розроблення та впровадження комп'ютерних програм проєктування оптимальних параметрів АС для отримання бажаних їх властивостей та управління ними.

Найбільш розповсюдженими у будівельній індустрії світу є електронні таблиці Excel. Їх пропонують на ринку програмних продуктів або розробляють власними зусиллями окремі спеціалісти. У складі Microsoft Excel є так званий розв'язувач (Solver), у якому використаний ГА, за допомогою якого можна знайти оптимальні значення кількості компонентів мінеральної частини АС. Крім того, наявність у середовищі Excel мови програмування Vasual Basic for Application (VBA) дає можливість створювати програми, що відповідають складності задачі оптимізації параметрів АС, та мають зручний інтерфейс користувача.

Сучасним є підхід до оптимізації процесу проєктування АС на базі моделей ШНМ різних видів, наприклад, запропонований в роботі [4]. В останні роки інструменти штучного інтелекту набули популярності. В інженерії проєктування дорожнього покриву ШНМ можна використовувати для інтерпретації складних даних, отриманих у результаті польових і лабораторних досліджень чи навіть отриманих комп'ютерним імітаційним моделюванням. ШНМ в основному застосовують в трьох основних сферах будівництва та ремонту дорожнього покриву, а саме в оцінюванні структурного стану дорожнього покриву, прогнозуванні аварійного стану дорожнього покриву та оцінюванні властивостей АС.

На нашу думку, можна зробити висновок про доцільність розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші в табличному процесорі Microsoft Excel, як найбільш поширеному в будівельній індустрії і доступному для більшості користувачів.

Проблематика. Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Приймаючи до уваги значну трудомісткість оптимізації зернового складу АС, її доцільно здійснювати за допомогою комп'ютерного забезпечення, спираючись на найбільш поширені і добре відомі спеціалістам програмні засоби, а саме на табличний процесор Microsoft

Excel. Розроблення і впровадження такого програмного забезпечення сприятиме розвитку теорії проєктування зернового складу АС і полегшить її практичне застосування.

Мета. Метою статті є розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші, що задовольняє вимогам державних стандартів [1, 7–9], із застосуванням табличного процесора Microsoft Excel без застосування макросів і VBA.

Матеріали і методи. Для оптимізації підбору зернового складу АС було прийнято табличний процесор Microsoft Excel.

Результати. Розроблена нелінійна математична модель задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС з цілочисловими змінними та обмеженнями, яку слід розв'язувати розвиваним методом, проте, якщо шукати наближення до кривої з максимальною градацією щільності, то стає можливим застосування методу зведеного градієнта.

Висновки. Аналіз доступних джерел інформації показав, що вирішення проблеми вибору оптимального зернового складу мінеральної частини асфальтобетону потребує застосування сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм для зменшення витрат часу на обробку і аналіз результатів лабораторних досліджень.

Найбільш поширеними програмними засобами у будівельній індустрії, зокрема в лабораторному забезпеченні виготовлення асфальтобетонної суміші, є табличний процесор Microsoft Excel. У статті продемонстрована методика розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel без застосування макросів мови програмування VBA, що дає змогу обробляти та аналізувати результати лабораторних досліджень спеціалістам, які не знайомі з програмуванням.

Ключові слова: асфальтобетон, зерновий склад, оптимізація, Microsoft Excel.

Вступ

Композиція зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші суттєво впливає на властивості дорожнього асфальтобетону, а саме на його міцність, шорсткість, довговічність, стійкість, надійність, якість тощо, особливо при застосуванні вторинних відходів промисловості. Підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (далі – АС) передбачає розрахунок таких його параметрів, які, у тому числі, задовольняють вимогам табл. 6 і табл. 7 ДСТУ Б В.2.7-119:2011 [1].

Вибір складу заповнювача та вмісту в'яжучого АС, яка відповідає вимогам специфікації, є тривалою процедурою спроб і помилок, а успіх у проєктуванні АС значною мірою залежить від досвіду проєктувальника. Подоланню цього утруднення може сприяти розроблення та впровадження комп'ютерних програм проєктування оптимальних параметрів АС для отримання бажаних їх властивостей та управління ними.

Взагалі були запропоновані три основних підходи до комп'ютеризації обчислень обробки результатів лабораторних досліджень та оптимізації параметрів АС:

1) електронні таблиці Excel для виконання об'ємного аналізу АС (Asphalt Mix Design Tools), наприклад, за методикою частини 5 посібника [3];

2) оптимізація процесу проєктування оптимальної АС з використанням штучних нейронних мереж (далі – ШНМ) та генетичного алгоритму (далі – ГА), наприклад, [4];

3) покращення проєктування та управління виробництвом АС за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання та оптимізації параметрів АС в реальному часі [5].

Найбільш розповсюдженими у будівельній індустрії світу є електронні таблиці Excel. Їх пропонують на ринку програмних продуктів або розробляють власними зусиллями окремі спеціалісти. У складі Microsoft Excel є так званий розв'язувач (Solver), у якому використаний ГА, за допомогою якого можна знайти оптимальні значення кількості компонентів мінеральної частини.

АС. Крім того, наявніть у середовищі Excel мови програмування Vasual Basic for Application (VBA) дає можливість створювати програми, що відповідні складності задачі оптимізації параметрів АС, та мають зручний інтерфейс користувача.

Сучасним є підхід до оптимізації процесу проєктування АС на базі моделей ШНМ різних видів, наприклад, запропонований у роботі [4]. В останні роки інструменти штучного інтелекту набули популярності. В інженерії проєктування дорожнього покриву ШНМ можна використовувати для інтерпретації складних даних, отриманих у результаті польових і лабораторних досліджень чи навіть отриманих комп'ютерним імітаційним моделюванням. ШНМ в основному застосовують в трьох основних сферах будівництва та ремонту дорожнього покриву, а саме в оцінюванні структурного стану дорожнього покриву, прогнозуванні аварійного стану дорожнього покриву та оцінюванні властивостей АС.

Теоретичні та практичні питання побудови і застосування ШНМ викладені [6]. У ньому також розглянуті програмні засоби для моделювання нейронних мереж, а саме:

– моделювання нейронних мереж у пакеті Matlab;
– моделювання нейронних мереж у пакеті Statistica Neural Networks;
– моделювання нейронних мереж засобами бібліотек мови Python.

Matlab – це платформа програмування та числових обчислень, яка використовується для аналізу даних, розроблення алгоритмів і створення моделей. Matlab розроблена спеціально для інженерів і вчених для аналізу та проєктування систем і продуктів. Для моделювання ШНМ за допомогою пакета Matlab необхідно встановити і використовувати бібліотеку Deep Learning Toolbox. Бібліотека містить функції для моделювання неглибоких (shallow networks) і глибоких (deep networks) нейронних мереж.

Statistica Neural Networks – це універсальний пакет нейромережевого аналізу від фірми StatSoft, який може працювати як самостійний додаток, а також у рамках системи Statistica. Він містить методи навчання мережі, має можливість створювати складні комбінації з мереж різних архітектур, дозволяє вибіркове навчання фрагментів нейронної мережі, забезпечує повний контроль над вибором функцій активації; містить систему Network Wizard (Нейро-Майстер), що допомагає користувачу приймати рішення і вибирати параметри. Пакет Statistica Neural Networks підтримує інтерфейс прикладного програмування, завдяки якому досвідчені користувачі можуть використовувати обчислювальні можливості модуля Statistica Neural Networks у своїх власних додатках.

Мова Python є однією з найбільш популярних мов програмування в останнє десятиріччя. Завдяки безкоштовним засобам розроблення та потужним бібліотекам Python знаходить широке використання при розробленні прикладного програмного забезпечення та вирішенні наукових задач. Зокрема велика кількість потужних бібліотек Python для моделювання нейронних мереж та розпізнавання образів дозволяє вирішувати задачі штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних.

Третій підхід (за допомогою комп'ютерного імітаційного моделювання та оптимізації параметрів АС в реальному часі) також потребує застосування пакету прикладних програм для імітаційного моделювання – створення цифрового двійника на основі історичних даних і порівняння з фактичними результатами досліджуваної системи. У програмному забезпеченні Arena™ Simulation використовується метод дискретних подій (особливих станів АС у ході її виробництва), але програмний комплекс також охоплює області потокового та агентного моделювання [5].

Зауважимо, що використання цих пакетів потребує значних зусиль користувача для їх засвоєння і для подальшого практичного застосування відповідно сучасній парадигмі проєктування АС.

На нашу думку, можна зробити висновок про доцільність розв'язання задачі пошуку

оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини асфальтобетонної суміші в табличному процесорі Microsoft Excel, як найбільш поширеному в будівельній індустрії і доступному для більшості користувачів.

У статті наведено розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС за допомогою розв'язувача (Solver) Excel (на прикладі АСГ. Кр.Щ.Б1.НП). Результати лабораторних досліджень звичайно оформлюють у таблицях Excel, наведених на **рис. 1** та позначених номерами ①, ②, ③, ④ і ⑤. Клітини, які можна редагувати залиті зеленим кольором. При введені даних аркуш повинен бути захищеним. Нижче на **рис. 1** і **рис. 2** наведено аркуш із таблицями та графіками підбору зернового складу мінеральної частини АС. Таблиці, позначені на аркуші номерами ②, ③, ④ і ⑤, розраховують із використанням формул (на прикладі сита 20 мм і щебня фракції 20-40):

② – «=(E3/P3)*100», ③ – «=C17+E10», ④ – «=100-E17», ⑤ – «=(B31*E24)/100» Суміш – «=SUM(E31:E35)»; середня суміш – «=AVERAGE (E37:E38)»; відхилення – «=(E36-E39)^2». Інші клітини розраховують із використанням аналогічних формул із відповідною адресацією.

З метою контролю даних застосоване умовне форматування. Так, на **рис. 1** світло-червоною заливкою відмічений випадок перевищення верхньої границі, а жовтою – значення менші від нижньої границі допустимої області.

Для побудови математичної моделі задачі оптимізації композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС позначимо:

x_1 – щебінь фракції 20-40, відсотків за масою;
x_2 – щебінь фракції 10-20, відсотків за масою;
x_3 – щебінь фракції 5-10, відсотків за масою;
x_4 – пісок, відсотків за масою;
x_5 – порошок мінеральний, відсотків за масою.

Приймемо, що x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 приймають цілі значення при обмеженнях:

Цільова функція:

$$\sum_{i=1}^{i=5} x_i = 100\ \%; \tag{1}$$

$$x_i \geq x_i^{\min}, i = \overline{1,..,5}; \tag{2}$$

$$x_i \leq x_i^{\max}, i = \overline{1,..,5}. \tag{3}$$

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \sqrt[2]{\sum_{j=1}^{j=N} (\sum_{i=1}^{i=5} s_{ji} - (u_j - l_j)/2)^2} \Rightarrow \min; \tag{4}$$

$$u_j > l_j, j = \overline{1,..,N}, \tag{5}$$

де N — кількість сит (дорівнює 11);
s_{ji} — відсоток проходження i-го компонента через j-те сито;
u_j — верхня границя % проходження допустимої області суміші на j-му ситі;
l_j — нижня границя % проходження допустимої області суміші на j-му ситі.

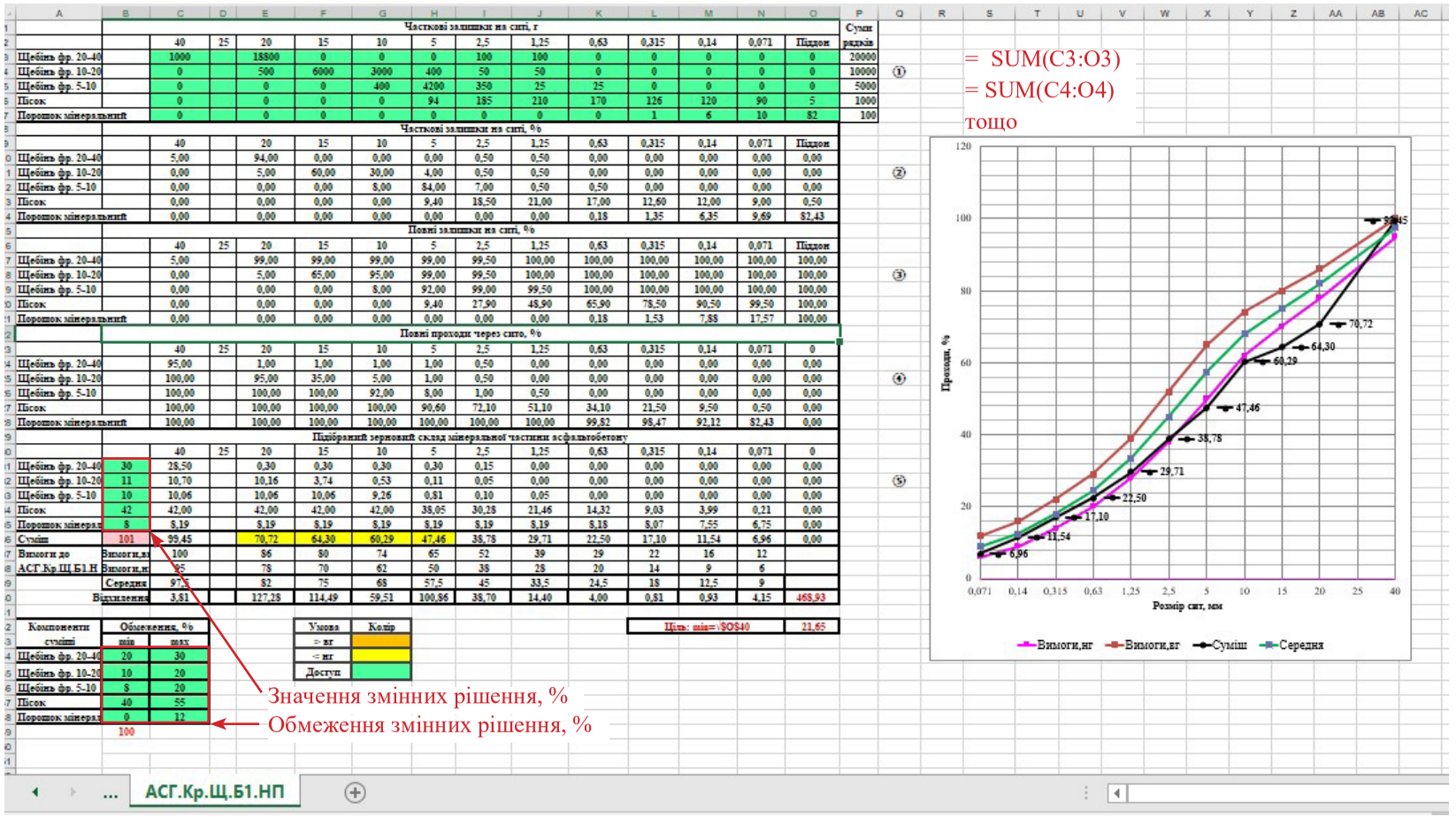

Рисунок 1 – Електронні таблиці та графіки Excel результатів підбору композиції зернового складу мінеральної частини гарячої АС (АСГ.Кр.Щ.Б1.НП) з навмисно зробленими помилками до оптимізації з умовним форматуванням

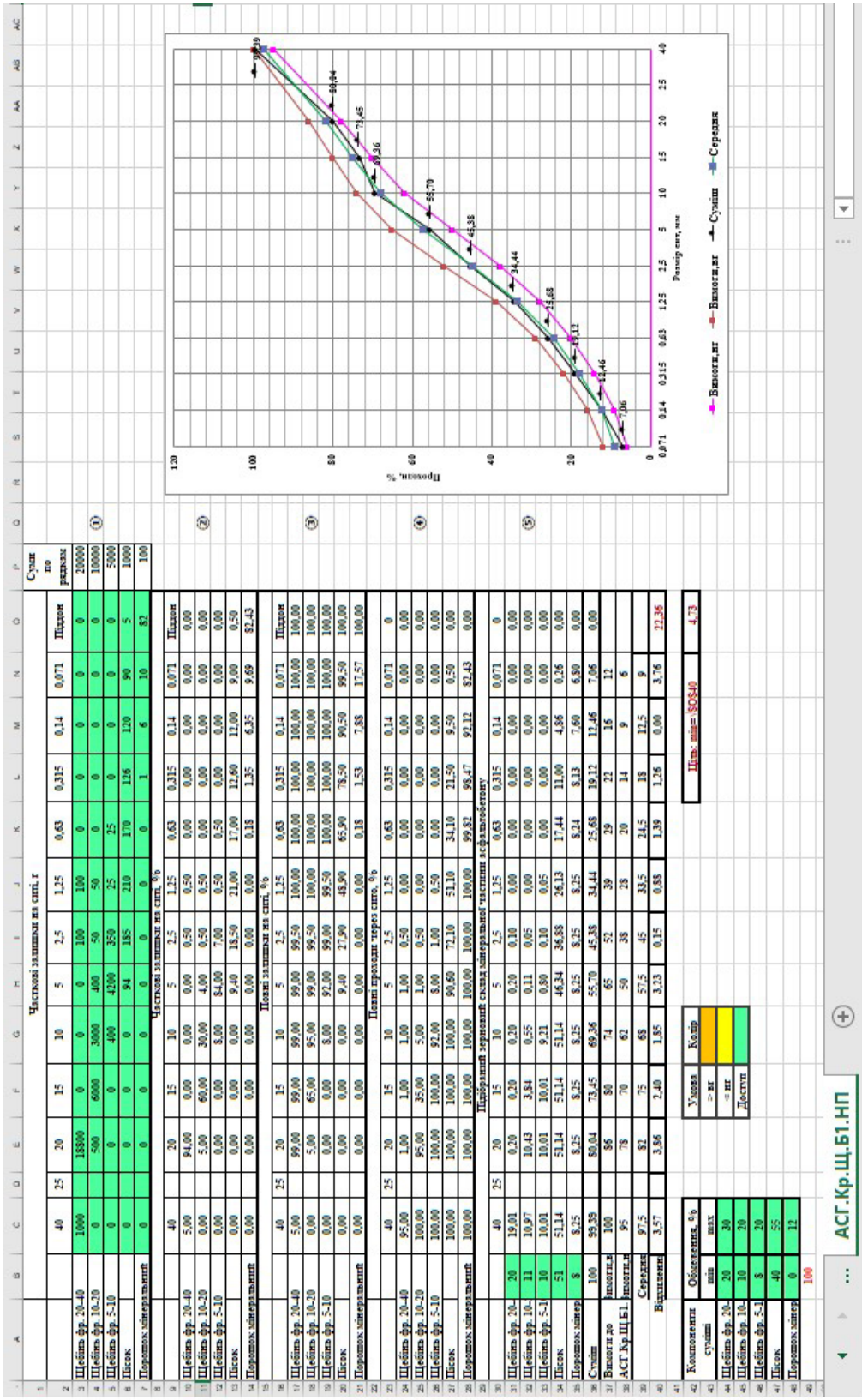

Рисунок 2 – Електронні таблиці та графіки Excel результатів розв'язання задачі пошуку оптимальної композиції зернового складу мінеральної частини гарячих АС (АСГ.Кр.Щ.Б1.НП) після оптимізації

Таким чином, значенням цільової функції є корінь квадратний із суми квадратів відхилень графіка лінії шуканої суміші від графіка лінії середньої суміші $(u_j - l_j)/2$. Критерієм оптимальності є мінімальне значення цільової функції.

У розв'язувачі (Solver) Excel передбачені три методи вирішення задач оптимізації:

– симплекс-метод для лінійних задач;

– метод зведеного градієнта (Generalized Reduced Gradient – GRG) для нелінійних задач із гладкою функцією [10];

– розвиваний (еволюційний) метод розв'язувача для нелінійних задач із негладкою функцією.

Графіки верхньої та нижньої границь нормативних вимог, середньої суміші та оцінюваної суміші являють собою ламані лінії при логарифмічній шкалі розміру сит, отже задача є нелінійною і має негладку функцію.

Проте, найщільнішу можливу градацію зернового складу мінеральної частини АС, яка називається максимальною градацією щільності або іноді кривою максимальної щільності Фуллера (W.B. Fuller), можна приблизно розрахувати за такою формулою [3, с. 32]:

$$\%PMD = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45} \cdot 100 \ \%, \tag{6}$$

де $\%PMD$ — відсоток проходження, градація максимальної щільності;

d — розмір сита, про який йдеться, мм;

D — максимальний розмір сита, мм.

Функція (6) є гладкою нелінійною, отже, на нашу думку, для оптимізації можна застосувати також метод зведеного градієнта розв'язувача MS Excel.

Порядок застосування розв'язувача MS Excel наведений на **рис. 3 – 9**.

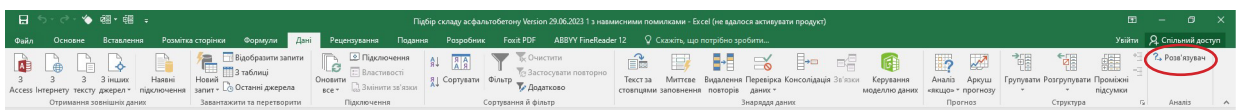

Рисунок 3 – Звернення до розв'язувача в Excel

Для практичного використання запропонованого підходу, поданому у статті для прикладу, слід створити певну кількість так званих шаблонів, які будуть відрізнятись значеннями верхньої і нижньої границь відсотків проходів через сита різних розмірів, які встановлені стандартами [1, 7, 8], прийнявши за основу викладений у статті і включивши в нього сита 25 мм. Це дасть користувачеві можливість зекономити витрати часу на формування правил умовного форматування, зменшить ймовірність внесення помилок.

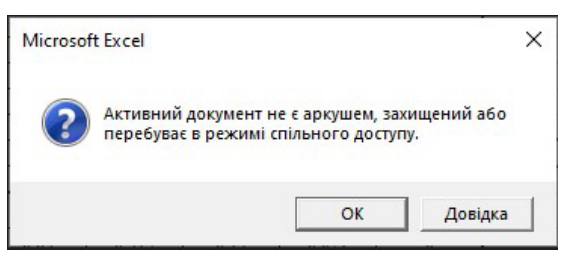

Рисунок 4 – Заборона виклику розв'язувача при захищеному аркуші

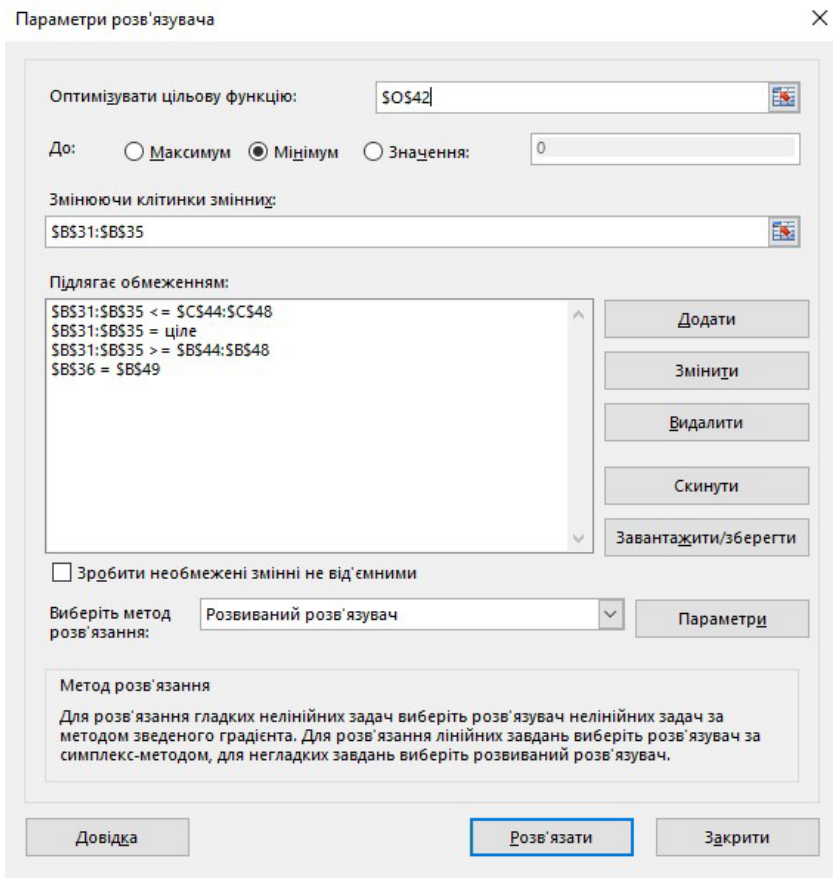

Рисунок 5 –Формування параметрів розвиваного розв’язувача

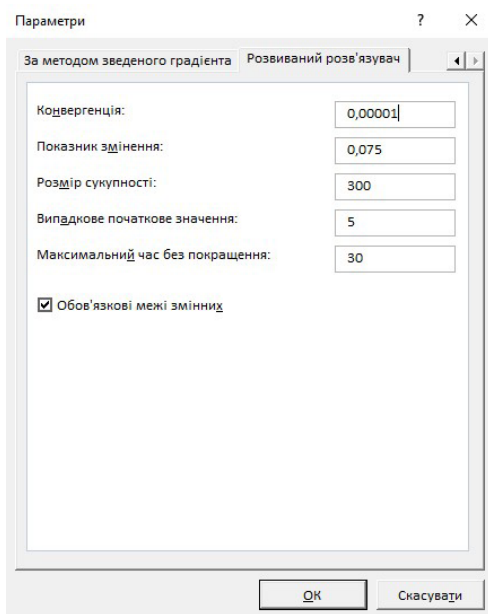

Рисунок 6 – Формування параметрів розвиваного розв’язувача

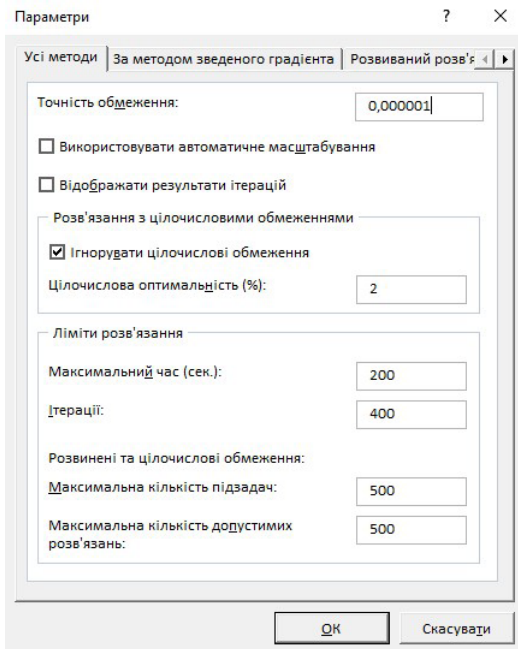

Рисунок 7 – Формування параметрів усіх параметрів розв’язувача

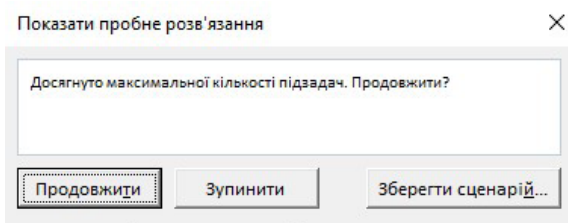

Рисунок 8 – Управління режимом розв’язання розв’язувача

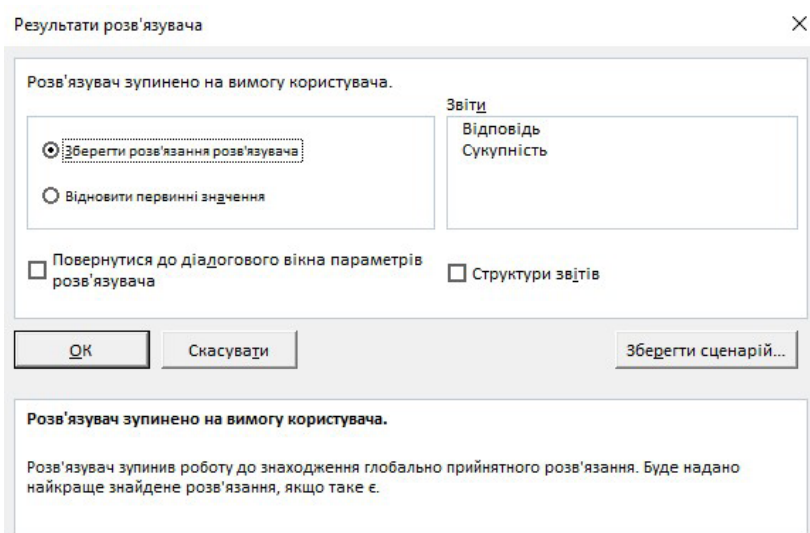

Рисунок 9 – Режими після розв’язання задачі оптимізації

Висновки

Аналіз доступних джерел інформації показав, що вирішення проблеми вибору оптимального зернового складу мінеральної частини асфальтобетону потребує застосування сучасних пакетів прикладних комп'ютерних програм для зменшення витрат часу на обробку і аналіз результатів лабораторних досліджень.

Найбільш поширеними програмними засобами у будівельній індустрії, зокрема в лабораторному забезпеченні виготовлення асфальтобетонної суміші, є табличний процесор Microsoft Excel. У статті продемонстрована методика розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel без застосування макросів мови програмування VBA, що дає змогу обробляти та аналізувати результати лабораторних досліджень спеціалістам, які не знайомі з програмуванням.

Розроблена нелінійна математична модель задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС з цілочисловими змінними та обмеженнями, яку слід розв'язувати розвиваним методом, проте, якщо шукати наближення до кривої з максимальною градацією щільності, то стає можливим застосування методу зведеного градієнта.

Подальші дослідження у даному напрямі, на нашу думку, зв'язані із стратегічною перспективою створення на основі сучасної парадигми наукових досліджень життєвого циклу матеріалів для будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг Аналітичної експертної системи управління лабораторними дослідженнями та лабораторним бізнесом. У найближчий перспективі доцільне удосконалення методик розв'язання задачі оптимізації зернового складу мінеральної частини АС в середовищі Microsoft Excel із застосуванням макросів та VBA з розробленням відповідних шаблонів та і зрозумілого зручного інтерфейсу користувача.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7–119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2011. 37 с. (Інформація та документація).

2. Alshamsi K.S. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures (2006). *LSU Doctoral Dissertations*. 3811. URL: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/3811 (дата звернення: 01.08.2023).

3. NCHRP Report 673 A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary (2011). *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. *Washington, DC: The National Academies Press*. 273 pp. DOI: https://doi.org/10.17226/14524.

4. Sebaaly H., Varma S., Maina J. W. Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. URL: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/67040/Sebaaly_Optimizing_2018.pdf?sequence=1 (дата звернення: 01.08.2023).

5. Zhang M., Heitzman M., Smith A.E. Improving Hot Mix Asphalt Production Using Computer Simulation and Real Time Optimization. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014. 28(3): 04014011. URL: https://www.eng.auburn.edu/~aesmith/files/asce.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

6. Субботін С.О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. Житомир, 2020. 184 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6800/1/Subbotin_Neural.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

7. ДСТУ Б В.2.7–119:2011 Зміна № 1. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ. 2014. 7 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. Київ. 2015. 29 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та

аеродромний. Методи випробувань. Київ. 2016. 71 с. (Інформація та документація).

10. Lasdon Leon S., Fox Richard L., Ratner Margery W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle.* Tome 8, no V3 (1974). P. 73–103. URL: http://www.numdam.org/article/RO_1974__8_3_73_0.pdf (дата звернення: 01.08.2023).

References

1. DSTU B V.2.7–119:2011 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7–119:2011) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications]. Kyiv, 2011. 37 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

2. Alshamsi K.S. Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures (2006). *LSU Doctoral Dissertations*. 3811. URL: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/3811 (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

3. NCHRP Report 673 A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary (2011). *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. *Washington, DC: The National Academies Press*. 273 pp. DOI: https://doi.org/10.17226/14524 [in English].

4. Sebaaly H., Varma S., Maina J. W. Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. URL: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/67040/Sebaaly_Optimizing_2018.pdf?sequence=1 (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

5. Zhang M., Heitzman M., Smith A.E. Improving Hot Mix Asphalt Production Using Computer Simulation and Real Time Optimization. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014. 28(3): 04014011. URL: https://www.eng.auburn.edu/~aesmith/files/asce.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

6. Subbotin S.O. Neironni merezhi : teoriia ta praktyka [Neural networks: theory and practice: teaching]. Manual. Zhytomyr, 2020. 184 p. URL:http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6800/1/Subbotin_Neural.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in Ukrainian].

7. DSTU B V.2.7-119:2011. Zmina № 1 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Specifications]. Kyiv. 2014. 7 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. DSTU B V.2.7-127:2015 Budivelni materialy. Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton shchebenevo-mastykovi. Tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-127:2015) Building materials. Asphalt-concrete mixtures and crushed-mastic asphalt concrete. Specifications]. Kyiv. 2015. 29 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. DSTU B V.2.7-319-2016 Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhnii ta aerodromnyi. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319-2016) Asphalt concrete mixtures and road and airfield asphalt concrete. Test methods]. Kyiv. 2016. 71 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

10. Lasdon Leon S., Fox Richard L., Ratner Margery W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle.* Tome 8, no V3 (1974). P. 73–103. URL: http://www.numdam.org/article/RO_1974__8_3_73_0.pdf (Last accessed: 01.08.2023) [in English].

Oleksii Sokolov, *https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*
M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine

DESIGNING OF OPTIMAL GRADING OF ASPHALT MIXTURES IN THE MS EXCEL ENVIRONMENT

Abstract

Introduction. The composition of the grading of the mineral part of the asphalt mixture significantly affects the properties of road asphalt, namely its strength, roughness, durability, stability, reliability, quality, etc., especially when using secondary industrial waste. The designing of asphalt mixture grading (hereinafter referred to as AM) involves the calculation of its parameters that, among other things, meet the requirements of Tables 6 and 7 of DSTU B V.2.7-119:2011 [1].

Designing the aggregate composition and binder content of an AM that meets the specification requirements is a lengthy trial-and-error procedure, and success in designing an AM largely depends on the designer's experience. This difficulty can be overcome by the development and implementation of computer software for designing the optimal AM parameters to obtain the desired properties and control them.

In general, three main approaches have been proposed to computerize the computations for processing laboratory test results and optimizing the parameters of the AM:

1) Excel spreadsheets for performing a volumetric analysis of AM (Asphalt Mix Design Tools), for example, according to the methodology of Part 5 of the manual [3];

2) optimization of the process of designing the optimal AM using artificial neural networks (hereinafter referred to as ANN) and genetic algorithm (hereinafter referred to as GA), for example, [4];

3) improving the design and management of AM production by means of computer simulation modeling and optimization of AM parameters in real-time [5].

Excel spreadsheets are the most common in the construction industry worldwide. They are offered on the software market or developed on their own by individual specialists who are familiar with Excel. Microsoft Excel includes a so-called Solver, which uses a GA to find the optimal number of components of the mineral part of the AM. In addition, the Visual Basic for Application (VBA) programming language available in Excel makes it possible to create programs that correspond to the complexity of the problem of optimizing the parameters of the AM and have a convenient user interface.

A modern approach to optimizing the process of AM designing based on ANN models of various types, for example, is proposed in [4]. Artificial intelligence tools have gained popularity in recent years.

In pavement design engineering, ANN can be used to interpret complex data obtained from field and laboratory tests or even computer simulation modeling. ANN is mainly used in three main areas of pavement construction and repair, namely, in assessing the structural condition of the pavement, predicting the emergency condition of the pavement, and evaluating the properties of asphalt concrete.

In our opinion, we can conclude that it is expedient to solve the problem of finding the optimal composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture in the Microsoft Excel spreadsheet processor, as it is the most common in the construction industry and accessible to most users.

Problem Statement. The composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture significantly affects the properties of road asphalt concrete, namely its strength, roughness, durability, stability, reliability, quality, etc., especially when using secondary industrial waste. The designing of asphalt mixture grading (hereinafter referred to as AM) involves the calculation of its parameters that, among other things, meet the requirements of Tables 6 and 7 of DSTU B V.2.7-119:2011 [1]. Taking into account the considerable labor intensity of optimizing the grading of AM, it is advisable to carry it out using computer software, relying on the most common and well-known software tools, namely

the Microsoft Excel spreadsheet processor. The development and implementation of such software will contribute to the development of the theory of designing the grading of AM and facilitate its practical application.

Purpose. The objective of the article is to solve the problem of finding the optimal composition of grading of the mineral part of the asphalt mixture that meets the requirements of state standards [1, 7, 8, 9] using the Microsoft Excel spreadsheet processor without the use of macros and VBA.

Materials and methods. The Microsoft Excel spreadsheet processor was used to optimize the designing of grading of the AM.

Results. A nonlinear mathematical model of the problem of optimizing the grading of the mineral part of the AM with integer variables and constraints has been developed, which should be solved by the developed method. However, if we look for an approximation to the curve with the maximum density gradation, then it becomes possible to use the method of the reduced gradient.

Conclusions. The analysis of available sources of information has shown that solving the problem of designing the optimal grading of the mineral part of AM requires the use of modern computer software packages to reduce the time spent on processing and analyzing the results of laboratory tests.

The most common software in the construction industry, in particular in the laboratory support for the production of asphalt mixtures, is the Microsoft Excel spreadsheet processor. The article demonstrates a methodology for solving the problem of optimizing the grading of the mineral part of the AM in Microsoft Excel without the use of VBA macros, which allows processing and analyzing the results of laboratory studies by specialists who are not familiar with programming.

Keywords: asphalt concrete, grading, optimization, Microsoft Excel.