

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДВОХ ВАРІАНТІВ ПІДСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В роботі представлено результати порівняльного аналізу двох варіантів підсилення земляного полотна. Математичне моделювання, проведене на основі методу скінченних елементів, дало змогу свідчити, що обидва варіанти підсилення позитивно впливають на напружено-деформований стан земляного полотна.

В работе представлены результаты сравнительного анализа двух вариантов усиления земляного полотна. Математическое моделирование, проведенное на основе метода конечных элементов, дало возможность свидетельствовать, что оба варианта усиления положительно влияют на напряженно-деформированное состояние земляного полотна.

In the article the results of comparative analysis of two variants of the ground bed strengthening are presented. The mathematical simulation conducted on the basis of finite-element method has given a possibility to testify that both variants of strengthening influence positively on the stressed-and-strained state of the ground bed.

Підвищення швидкостей залізниці потребує розробки нових конструкцій земляного полотна. Стан земляного полотна значною мірою визначає довговічність залізничної колії та об'єми робіт з поточного утримання. Оскільки земляне полотно є спорудою, яка експлуатується тривалий час, то всі роботи з його підсилення необхідно проводити під максимальні очікувані навантаження і швидкості руху поїздів.

Однією з існуючих тенденцій створення нових конструкцій земляного полотна є підсилення вже існуючих конструкцій із отриманням більш довговічного земляного полотна, що мало деформується [1, 2]. Для підсилення земляного полотна залізниць використовується спосіб перемішування слабкого ґрунту з в'язучим, які подаються під тиском всередину ґрунту [2]. За рахунок перемішування ґрунту з ними відбувається його зміцнення за рахунок створення стабілізаційних колон. В даний час важливе значення для зміцнення залізничних насипів надається влаштуванню захищаючих конструкцій у вигляді рядів паль із ростверками, а також типу «стіна в ґрунті», яка є спорудою із свердловин великого діаметру, які заповнюються каменем або бетоном, дотичних одна до одної. Стіни можуть бути також одержані розкриттям траншей, які заповнюються каменем. При цьому відсутній армокаркас, який застосовується при реалізації способу «стіна в ґрунті». Також одним із способів збільшення жорсткості земляного полотна є спосіб утворення в ньому ґрунтоцементних паль, що приводить до істотного зниження пластичних осідань всієї конструкції. При цьому ґрунтоцементна паля складається із центральної пілотної свердловини діаметром 160...200 мм, цементу, що нагніта-

ється з водою, і ґрунту насипу. Таким чином, суть методу полягає у тому, що в земляному полотні виготовляються стабілізаційні палі з ґрунту і в'язучого. В результаті виходять несучі ґрунтові елементи, які сприймають тиск від верхньої будови шляху і навантаження потягу. Але більше розповсюдження отримали варіанти підсилення земляного полотна шляхом армування [2, 3].

Розроблені варіанти підсилення конструкції земляного полотна відрізняються один від одного наявністю особливих конструктивних елементів (розділюючий та морозостійкий шари, геомати, підсилюючі шари із бутового каменю, мінеральної суміші тощо), які дозволяють зменшити переміщення залізничного насипу і подовжити його нормальну експлуатацію на більш довгий період. Але з позиції зміни напружено-деформованого стану (НДС) земляного полотна вплив цих елементів досліджено мало, оскільки розрахунок неоднорідного насипу зі зміною деформаційних характеристик представляє деякі труднощі математичного та методологічного характеру.

Проте дослідження впливу різного типу підсилюючих елементів на НДС земляного полотна повинно виконуватися для того, щоб з'ясувати, який варіант підсилення є найбільш оптимальним. Ця задача є актуальною з цієї позиції ще й тому, що вплив підсилюючих елементів не є однозначним і відомим.

Для того, щоб науково обґрунтувати варіанти підсилення конструкції земляного полотна, проведено серію їх числових розрахунків з метою з'ясувати варіант із найбільш оптимальними характеристиками та найбільшою стійкістю, міцністю та стабільністю. Розрахунок НДС

конструкції земляного полотна проводиться із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою розрахункового комплексу Structure CAD for Windows, version 7.31 R. 4 (SCAD).

Модель для розрахунку для більшого врахування реальних характеристик об'єкту, що досліджується, прийнята просторовою на основі об'ємних скінченних елементів (СЕ). Всі геометричні та деформаційні характеристики земляного полотна взяті із нормативних докумен-

тів. Таким чином, розроблена просторова модель базується на реальних характеристиках земляного полотна висотою 6 м для одноколійної ділянки, які отримані при спорудженні існуючого насипу.

Розрахункова схема земляного полотна, яка змодельована у комплексі SCAD, виконана таким чином (рис. 1), що СЕ у схемі прийняті сумісними, тобто всі вузли сусідніх елементів співпадають, що позитивно впливає на точність рішення.

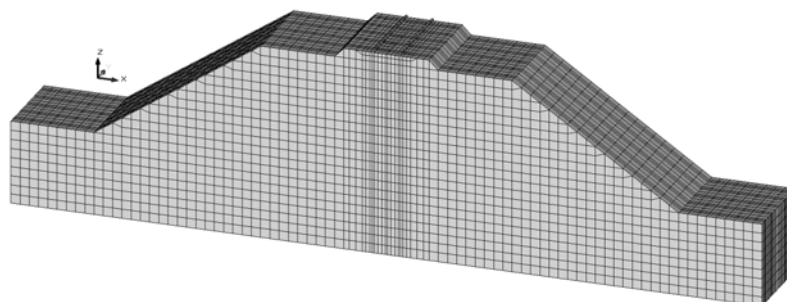


Рис. 1. Розрахункова схема земляного полотна насипу висотою 6 м

Загальна кількість вузлів схеми – 34 986 (біля 105 тис. степенів вільності, задача вважається великорозмірною), кількість скінченних елементів – 31 500. Розміри моделі: довжина (основа) – 40,6 м, ширина – 5,0 м, висота – 10,5 м (з яких висота земполотна – 6 м).

Основні розміри СЕ коливаються у межах 0,15...0,5 м, тобто СЕ-сітка є адекватною розмірам представленої моделі, оскільки вважається, що основний розмір СЕ не повинен перевищувати 1/20 від характерного розміру моделі. У схемі застосовані як призматичні СЕ із трикутною основою (у моделюванні відкосу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земполотна та

основи). Призматичні СЕ із трикутною основою перевірені на умови вироджених та «голчастих» елементів, кути трикутника не менше 45° [4].

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всіх трьох осях X , Y та Z , по боках основи – заборона по осях X та Y , по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації).

Для подальшого дослідження обрано два варіанти підсилення земляного полотна (рис. 2): 1-й варіант – шар мінеральної суміші; 2-й варіант – пакет із георешітки та піску.

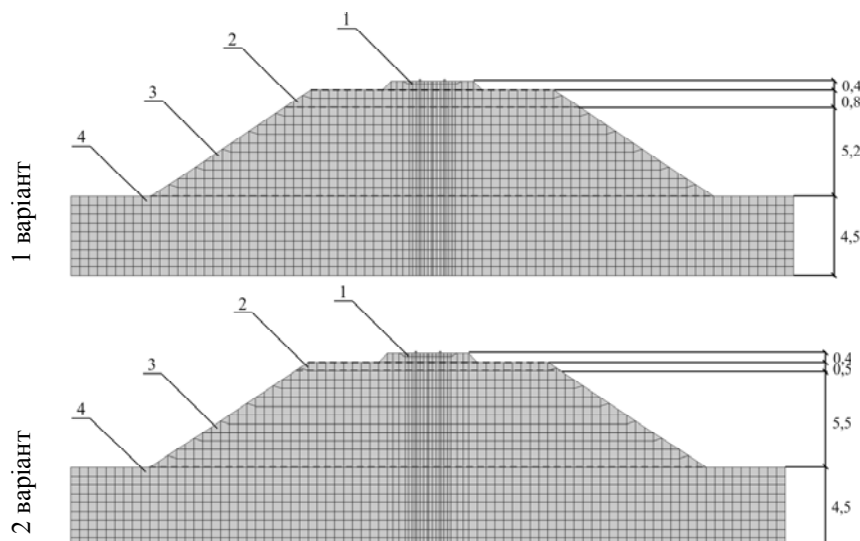


Рис. 2. Варіанти підсилення земляного полотна:

1) верхня будова колії (ВБК); 2) підсилюючий шар; 3) ущільнений суглинок; 4) слабка основа

Деформаційні характеристики, обрані відповідно до досліджених ґрунтів земляного полотна: жорсткість 1: слабка основа – суглинок; питома вага $\gamma = 1,9 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 25 \text{ 000 кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; жорсткість 2: ґрунт залізничного насипу – суглинок щільний; питома вага $\gamma = 1,9 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 50 \text{ 000 кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$; жорсткість 3: баластна призма – щебінь; питома вага $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 150 \text{ 000 кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; жорсткість 4: шпала – залізобетон; питома вага $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 4 \cdot 10^7 \text{ кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; жорсткість 5: рейка – сталь; питома вага $\gamma = 7,7 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 21 \cdot 10^7$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; жорсткість 6: матеріал підсиленого шару.

Для першого варіанту підсиленням шаром є мінеральна суміш; питома вага $\gamma = 2,3 \text{ т/м}^3$; модуль пружності $E = 200 \text{ 000 кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$; для другого варіанту – пакет з піску, який знаходиться між двома георешітками; питома вага $\gamma = 1,7 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E = 160 \text{ 000 кПа}$; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,2$.

У ролі навантаження моделі було прийнято локомотивне, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від локомотиву ($P = 30 \text{ т}$) (рис. 3).



Рис. 3. Схема поїздного навантаження

Навантаження на вісь локомотива розподілене по ширині рейки (рис. 4), на яку воно приходиться, причому воно розподілене по двох вузлах СЕ, які входять до геометричного місця розміщення рейки.

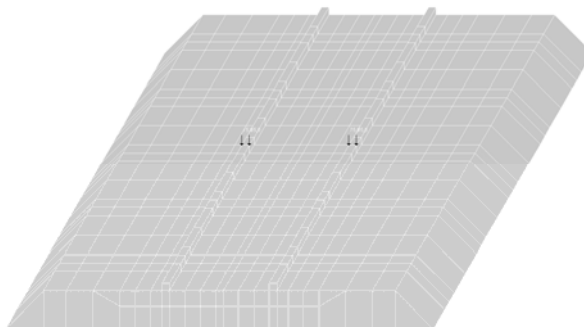


Рис. 4. Розташування навантажень на ВБК

Усі геометричні розміри та загальні навантаження на модель зберігаються та контролюються у ході виконання розрахунку, що можливе у застосованому розрахунковому комплексі. При розрахунку МСЕ застосовувався мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості з автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD.

Результатами розрахунку є загальні переміщення по осі Z (переміщення по осі X складають менше 0,1 мм і тому не виводяться на візуалізацію) та нормальні напруження моделі по осях X та Z, причому нижченаведені результати показують характерну картину їх розподілення у земляному полотні.

На рис. 5 – 7 наведені результати розрахунку МСЕ земляного полотна із поїздним навантаженням.

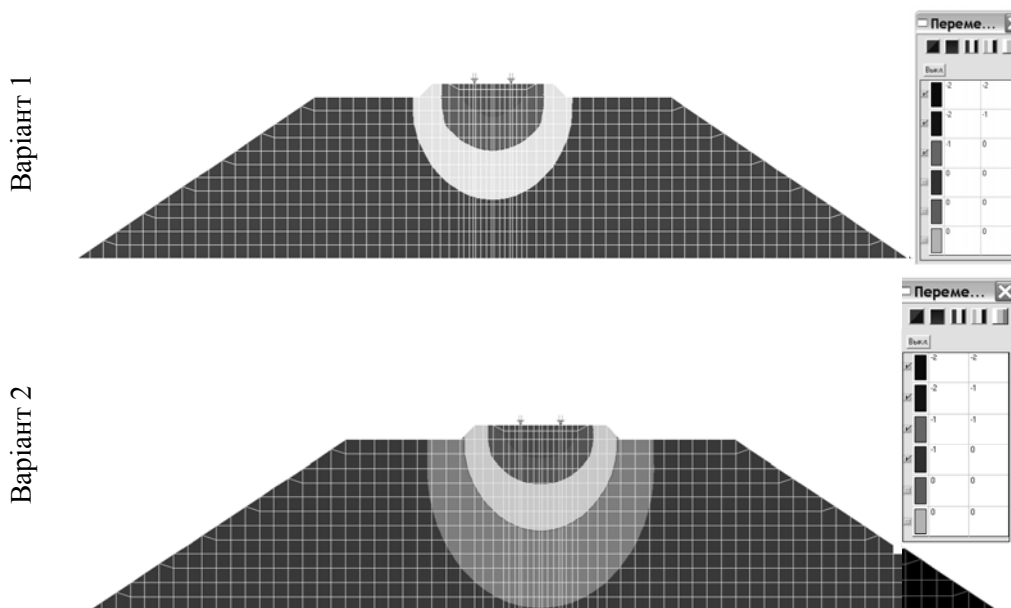


Рис. 5. Ізольні та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) у фрагменті моделей (земляне полотно і ВБК)

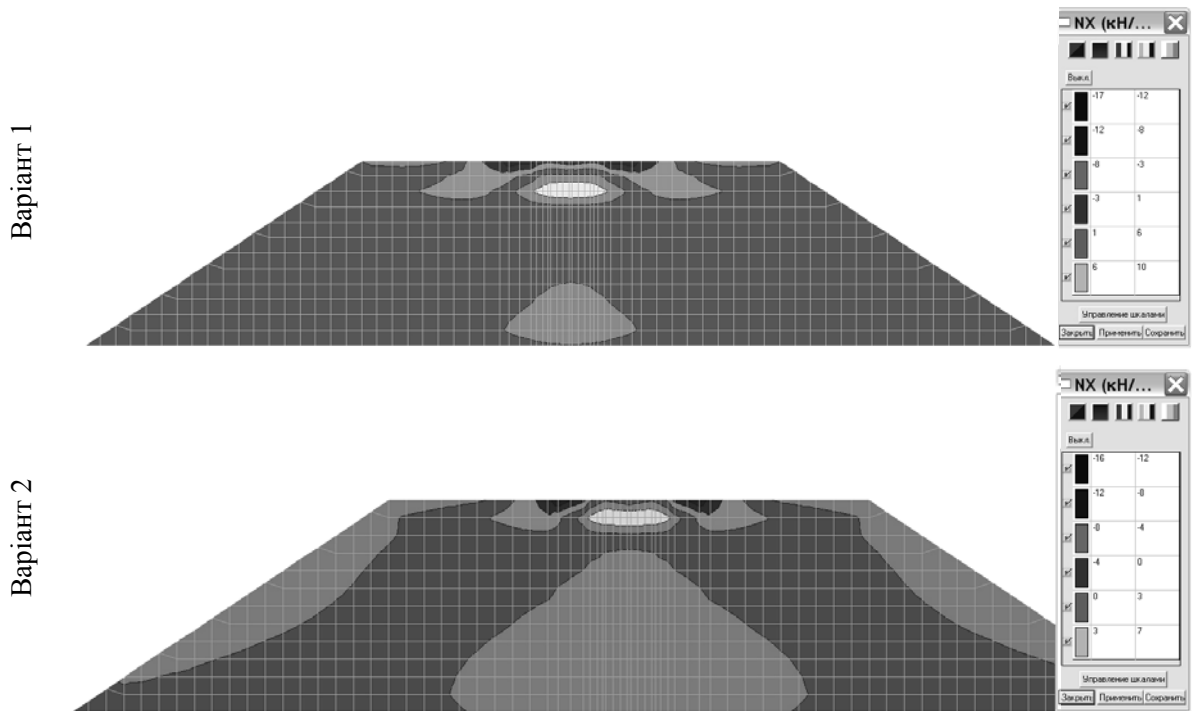


Рис. 6. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі X (горизонтальна) у фрагменті моделей

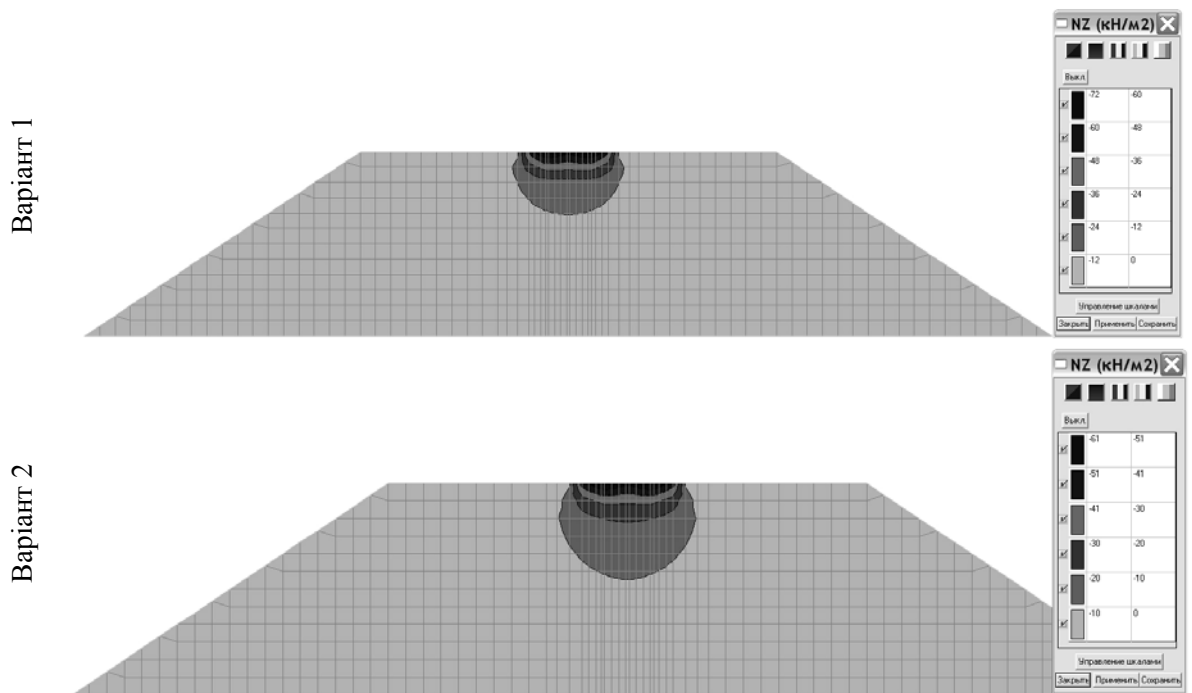


Рис. 7. Ізолінії та ізополя нормальних напружень по осі Z (вертикальна) у фрагменті моделей

Із аналізу рис. 4 – 6 можна зробити наступні висновки:

1. Кількісно переміщення в обох варіантах знаходяться у нормативних межах (максимальні значення – 1...2 мм). Але слід відмітити значні відміни у якісному розподілі вертикальних переміщень у Варіанті 1 та 2, які позначені більшою глибиною розподілу та площиною дії. Це свідчить про те, що вплив підсилюючих шарів обох варіантів на зменшення деформацій

ВБК та основної площадки майже однаковий, хоча у Варіанті 1 розповсюдження переміщень по висоті насипу закінчується на глибині 3,75 м, а у Варіанті 2 сягає 6,0 м. Однак, окрім ізополів зі значенням -1 мм, яке з'явилося у Варіанті 2 (рис. 5), кількісний та якісний характер розподілу ізополів під рейко-шпальною решіткою в обох варіантах майже ідентичний. Із цього можна зробити висновок, що обидва варіанти значно покращують деформований стан зем-

ляного полотна, зменшуючи вертикальні переміщення, причому їх значення свідчать про їх однозначний зворотній характер (ці переміщення відповідні пружній зоні роботи матеріалу земляного полотна).

2. Розподіл нормальних горизонтальних напружень для двох варіантів також відрізняється як якісно, так і кількісно (рис. 6), причому у Варіанті 2 спостерігається збільшення ізополя в тілі насипу в декілька разів на відміну від Варіанту 1. Однак, загальний напружений стан земляного полотна, наприклад, під рейко-шпальною решіткою має невеликі відмінності. Причому, значення максимальних напружень відповідають Варіанту 1 ($-0,017$ МПа) на відміну від Варіанту 2 ($-0,016$ МПа), але надто малі значення свідчать, що обидва варіанти не відчувають значної напруженості в горизонтальній площині та зсувів, спричинених високим рівнем напружень, не відбувається.

3. Горизонтальні напруження у ВБК (рис. 6) для двох варіантів є майже ідентичними, а максимальні значення ($-6,5$ МПа – Варіант 1 та $-6,6$ МПа – Варіант 2), які знаходяться на поверхні рейок і шпал, не викликають жодного перенапруження.

4. Розподіл вертикальних напружень (рис. 7) свідчить про те, що у Варіанті 1 напруження від дії локомотиву сягають глибини $2,0$ м, а у Варіанті 2 – $3,2$ м. Однак, максимальні напруження у Варіанті 1 сягають $-0,072$ МПа, а у Варіанті 2 $-0,061$ МПа. Ця ситуація пояснюється впливом деформаційних властивостей та товщини підсилюючих шарів, які зменшуючи вертикальні переміщення у Варіанті 1, викликають деяке перенапруження у тілі насипу. Таким чином, менша товщина підсилюючого шару Варіанту 2 ($0,5$ м на відміну від $0,8$ м у Варіанті 1), хоча і дозволяє зменшити вертикальні напруження приблизно на $18...20$ %, дещо збільшує переміщення. Однак, значення вертикальних напружень в обох варіантах свідчить про його роботу в пружній стадії і значні коефіцієнти запасу.

5. Картини розподілу нормальних вертикальних напружень (рис. 7) та дотичних напружень у площині XZ (за браком місця не показані) не викликають ніякої перестороги, оскільки як максимальні значення відповідають рейкам і шпалам, а напруження у баластній призмі сягають $-4,0$ МПа і $-4,2$ МПа відповідно до Варіантів 1 та 2, що значно менше значення міцності матеріалу баласту.

Основним висновком після порівняльного аналізу НДС обох варіантів є те, що обидва варіанти підсилення земляного полотна на слабкій основі добре впливають на деформований стан, зменшуючи вертикальні переміщення ВБК і основної площадки, та покращують напружений стан, значення якого дає змогу свідчити про нормальну експлуатацію земляного полотна.

Вибір варіанту підсилення, окрім проведеного наукового обґрунтування, повинен бути всебічно проаналізований з позиції техніко-економічного порівняння та обсягу виконання робіт із його створення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила і технологія виконання робіт при поточному утриманні залізничної колії. ЦП/0084 [Текст]. – К., 2002. – 156 с.
2. ЦП-0204 Правила улаштування основної площадки земляного полотна при виконанні капітального ремонту та модернізації колії (ЦЮ 25.12.2008 р., реєстр. номер ЦП-0204) [Текст] / В. Д. Петренко та ін. – К.: Укрзалізниця. Головне управління колійного господарства, 2009. – 44 с.
3. Технические указания по применению нетканых материалов для усиления земляного полотна: ЦП-4591 [Текст] / МПС СССР. Главное управление пути. – М.: Транспорт, 1989. – 47 с.
4. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.

Надійшла до редколегії 09.09.2009.

Прийнята до друку 15.09.2009.