

*В.Д. Петренко, д.т.н., професор
М.А.Лісневський, асистент (аспірант)
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КУТОВОЇ ПІДПІРНОЇ СТІНКИ НА ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ

Наведено результати дослідження напружено-деформованого стану кутової підпірної стінки на пальовому фундаменті з використанням програмного комплексу «LIRA».

Ключові слова: *пальова підпирна стінка, ґрунтовий масив, тривимірний скінченноелементний аналіз.*

*В.Д. Петренко, д.т.н., професор
М.А.Лісневський, асистент (аспірант)
Дніпропетровський національний університет
железнодорожного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГОЛКОВОЙ ПОДПОРНОЙ СТЕНКИ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния уголкового подпорной стенки на свайном фундаменте с использованием программного комплекса «LIRA».

Ключевые слова: *свайная подпорная стенка, ґрунтовый массив, трехмерный конечноэлементный анализ.*

*V.D. Petrenko, Ph.D
M.A.Lisnevskiy, Postgraduate student (Assistant)
Dnepropetrovsk National Academician V. Lazaryan University of Railway Transport*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS AND DEFORMED STATE OF THE ANGLE RETAINING WALL ON PILE FOUNDATION

The results of research of the stress and deformed state of the angle retaining wall are resulted on pile foundation with the use of the complex LIRA.

Keywords: *pile retaining wall, soil massif, three-dimensional finite-elements analysis.*

Вступ. Пальові підпирні стінки є новим типом підтримки споруд в автомобільному і залізничному будівництві в Україні. Сучасне будівництво потребує максимального використання простору в місті. При будівництві виникають певні труднощі, пов'язані зі збереженням стану вже існуючих будівель та основ під ними. У цих умовах важливу роль відіграють інженерні захисні споруди й технології їх застосування, які повинні забезпечити мінімальні зміни напружено-деформованого стану (НДС) конструкції при експлуатації.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Напружено-деформований стан та несучу здатність пальових підпирних стінок у деяких

країнах, включаючи Україну, вивчають упродовж останнього десятиріччя [1 – 3]. При цьому деякі дослідники вивчали передачу навантаження в розрахунковому методі НДС пальової підпірної стінки. Механічні характеристики та механізм передачі навантаження напалі підпірної стінки були вивчені за допомогою числового методу [1]. Механічний підхід при розрахунку пальової підпірної стіни був також використаний у рамках тестування фізичної моделі [2]. Модифікований метод проектування пальової підпірної стінки запропоновано на основі наукових досліджень навантажень, прикладених до споруди [3].

У результаті проведених досліджень було розглянуто взаємодію між палями, ростверком та підпірною стінкою і механізм передачі навантаження на споруду. Наведено також деякі спрощені методи розрахунку, які можуть бути використані для проектування підпірних стінок. Однак поки що немає даних про польові дослідження, які можуть бути використані для перевірки результатів, отриманих за допомогою чисельного моделювання або тестування фізичної моделі. У цій статті був використаний тривимірний скінченно-елементний аналіз для вивчення бічного тиску ґрунту на задню поверхню стіни, розподілу напружень і сил у ростверку і палях. Результати, отримані в роботі, були також порівняні з даними, одержаними при застосуванні існуючого методу проектування. Деякі цінні поради висловлено для підтримки проектування пальових підпірних стінок майбутньому.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Виходячи з припущення, що несуча здатність фундаменту недостатня, палевий фундамент може бути використаний для зниження впливу будівництва нових підпірних споруд на автомобільних і залізничних дорогах біля вже існуючих або в місцях щільної міської забудови та гарантувати стабільність фундаменту. Останнім часом із цієї причини підпірні стінки на палях почали використовуватися при проектуванні автомобільних розв'язок і залізничного земляного полотна. Проте при використанні простого методу сучасної будівельної механіки для розрахунку конструкції підпірних споруд блоки стінки, ростверк і палі розглядаються як самостійні елементи. Взаємний вплив паль підпірних стін, ростверку, ґрунту не повною мірою враховується в цих методах проектування. Завдяки широкому застосуванню нового типу підпірних споруд, необхідне систематичне вивчення напружень, деформацій і механізму передачі навантажень від усіх елементів пальової підпірної стінки, щоб створити теоретичну основу для проектування.

Постановка завдання. Установлено, що при проектуванні підпірних стінок ростверк та палі вважаються незалежними елементами. Оскільки спільна дія підпірної стінки, паль і ростверку, вплив ґрунту або скельної основи на споруду враховуються не повною мірою, то є деякі обмеження в існуючих методах їх проектування. На основі аналізу тривимірного

скінченноелементного рішення було вивчено бічний тиск ґрунту на стінку, розподіл напружень і сил підкріплення ростверку й паль. Виконано математичне моделювання складної системи «ґрунт – підпірна стінка – паля». Ці результати показали, що розтяжні напруження були дуже маленькими і позитивними у більшості зон ростверку та паль. Установлено, що напруження, отримані з використанням сучасних методів проектування, були набагато меншими ніж розрахункові. Це пояснює той факт, що сучасний метод проектування ростверків і паль не вирізняється високою точністю й повинен бути оптимізованим, щоб ураховувати вплив фундаменту на всю споруду і взаємодію між різними її елементами.

Основний матеріал і результати. Зазвичай пальові підпірні стінки складаються з блоків підпірних стінок, ростверку та паль. Ростверк – це елемент передачі навантаження між стінкою і палями. Така структура може бути розділена на два види – пальові гравітаційні й пальові кутові підпірні стінки – залежно від її типу. Блоки підпірної стінки і палі виконано як типові конструкції із залізобетону, а ростверк – з монолітного залізобетону на місці зведення споруди. Механічні характеристики паль підпірних стінок приймалися на основі заводських випробувань.

Пальова підпірна стінка, яка досліджується в цій статті, знаходиться в м. Києві на залізнично-мостовому переході через р. Дніпро – Автодорожня розв'язка з Наддніпрянським шосе (рис. 1), що запроектований з використанням уніфікованих залізобетонних конструкцій кутового профілю з блоків типу ІСВ (ІСВ–17 ... ІСВ–60). Загальна довжина правобічної стінки становить 84 м. При цьому на ділянці довжиною 42 м блоки підпірної стінки типу ІСВ (ІСВ–23 ... ІСВ–43) встановлені спільно з підшовними блоками типу ІПФ (ІПФ–23 ... ІПФ–43) на щелеву підготовку товщиною 0,2 м. Далі на ділянці довжиною 42 м виконано влаштування 50-ти паль прямокутного перерізу 35×35 см, з них на частині ділянки довжиною 12 м забиті 12 паль типу С12–35Т5 довжиною 12 м кожна, а на іншій частині довжиною 30 м – 38 паль типу С14–35Т5 довжиною 14 м. У роботі розглянуто частину стіни довжиною 30 м з максимальною висотою 6,5 м і палями довжиною 14 м. Підфундаментною частиною стіни залягають насипний ґрунт з прошарками супіску; суглинок чорний; пісок середньої щільності від малого ступеня насичення до насиченого водою; супісок текучої консистенції; глина легка пилувата в основному напівтвердої консистенції та пісок дрібний середньої щільності, насичений водою. Рівень ґрунтових вод знаходиться приблизно на позначці 6 м від поверхні. Виходячи із цих умов, було використано пальову підпірну стінку для забезпечення стабільності споруди.

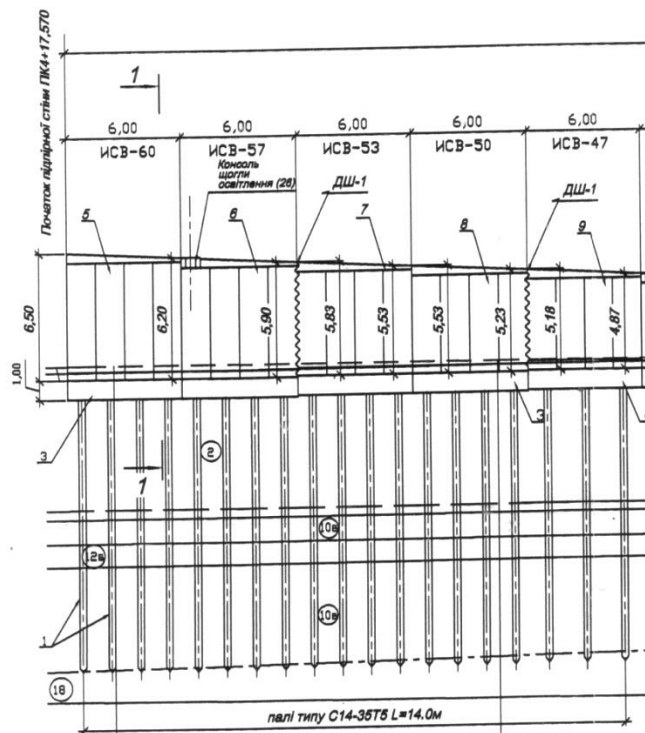


Рис. 1. Конструкція підпірної стінки:
2,10в, 12б, 18 – інженерно геологічні елементи (ІГЕ)

При висоті, більшій ніж 4,5 м, підпірні споруди виконано на фундаментах із забивних паль перерізом 35×35 см. Палі занурюються дизельним молотом у попередньо пробурені лідерні свердловини діаметром 30 см. Кінець палі за допомогою забивання заглиблюється на 1 м нижче забою свердловини. Палі розміщено в дрібному піску та супіску різної вологості. Забивання паль виконувалося до відмови, що відповідає розрахунковому навантаженню на палю в 42,3 т (423 кН). Вони з'єднувалися з підпірними стінками за допомогою залізобетонних ростверків довжиною 5990 мм, шириною 4500 мм і висотою 1000 мм.

Засипання пазух стін виконано дренажним піщаним ґрунтом з коефіцієнтом фільтрації 2 м/добу і щільністю 2 т/м³. Ущільнення ґрунту виконано шарами товщиною 30 см зі зволоженням водою, $K_{ущ}=1,02$.

У цьому дослідженні для моделювання кутової пальної підпірної стінки використовувався тривимірний скінченноелементний програмний комплекс LIRA[4], що є популярним методом скінченноелементного програмного забезпечення і перебуває на стадії постійного вдосконалення протягом багатьох років.

У роботі виконано моделювання ділянки стінки з ґрунтом довжиною 1,15 м, шириною 20,8 м і висотою 23 м, як показано на рис. 2. У поперечному напрямку призначається вісь x, у поздовжньому напрямку – вісь y, висотний напрямок – вісь z.

Сітку моделювання поверхні й усіх ґрунтів показано на рис. 2. Поздовжні та вертикальні межі моделі були зафіксовані для запобігання

переміщенню моделі на її кінцях. Межі нормального напрямку зафіксовано вздовж осей. Ліві й праві вертикальні межі було вибрано напрямках осей x та y . Базу основи було прийнято для запобігання будь-яким рухам у всіх напрямках. Висоту моделі взято з умови спільної роботи паль і ґрунтового масиву, представленого в основному вологими пісками. Сітку підпірної стіни, ростверку і палі показано на рис. 3.

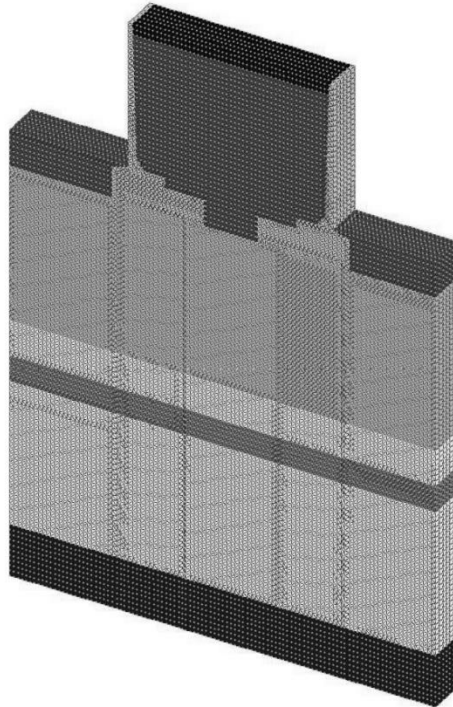


Рис. 2. Сіткова модель підпірної стінки з ґрунтовим масивом

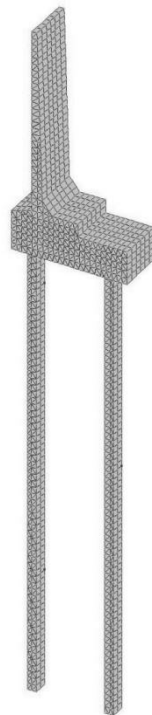


Рис. 3. Сіткова модель підпірної стінки з палевим фундаментом

Скінченноелементна модель містить такі деформаційні характеристики ґрунтів: модуль пружності $E, \text{МПа}$; коефіцієнт Пуассона ν ; питома вага ґрунту $\gamma, \text{кН/м}^3$.

Властивості й параметри залізобетону для скінченноелементного аналізу було визначено відповідно до проекту. Фізико-механічні характеристики моделі ґрунтів отримано за допомогою лабораторних випробувань і наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики матеріалів конструкції та ґрунтів

Тип	ІГЕ	Назва	Параметри		
			модуль пружності $E, \text{т/м}^2$	коефіцієнт Пуассона ν	щільність, т/м^3
1		Залізобетонні елементи підпірної стіни	$E=3,5 \times 10^6$	$\nu=0,2$	2,50
2		Шар асфальтобетону	$E=2,3 \times 10^6$	$\nu=0,2$	2,45
3		Матеріал засипки	$E=5000$	$\nu=0,3$	2,00
4	2	Насипний ґрунт 6 м	$E=1000$	$\nu=0,3$	1,80
5	10в	Пісок мілкий 1,4 і 5,6 м	$E=3100$	$\nu=0,3$	1,66
6	12б	Супісок 1м	$E=900$	$\nu=0,3$	1,77
7	18	Глина «Київський мергель» 2 м	$E=2500$	$\nu=0,3$	1,87

Для розрахунку напружено-деформованого стану було задано навантаження уз'єднаннях скінченних елементів, на які розподіляється підпірна стінка. При цьому прийнято сумарне навантаження від власної ваги ґрунту і підпірної стінки, а також навантаження від автотранспорту типу НК-100.

Зворотнезасипання ґрунту та ґрунти основ було змодельовано за допомогою моделі Кулона – Мора, що є пружно-пластичною моделлю, здатною враховувати розширення ґрунту. З урахуванням того, що підпірна стінка, залізобетонний ростверк і палі є значно більш жорсткими, ніж основа і ґрунт зворотного засипання, всі елементи споруди було прийнято як пружний матеріал.

Результати розрахунку в програмному комплексі «LIRA» наведено в таблицях 2 – 5 і на рис. 4 – 8.

Таблиця 2. Переміщення вусій моделі

Модель з підпірною стінкою без паль	Модель з підпірною стінкою на пальовому фундаменті
Переміщення по осі $z, \text{мм}$	
0–156	0 – 44,3
Переміщення по осі $x, \text{мм}$	
-13,7 – 11,6	-5,66 – 5,84
Переміщення по осі $y, \text{мм}$	
-0,0028–0,0027	-0,153–0,487

Таблиця 3. Переміщення у моделі підпірної стінки

Кутова підпірна стінка без паль	Кутова підпірна стінка на пальному фундаменті
Переміщення по осі z, мм	
-130 – (-136)	-17,3 – (-21,8)
Переміщення по осі x, мм	
-4,04 – 6,92	-5,65 – 5,83
Переміщення по осі y, мм	
-0,0006 – 0,0011	-0,011 – 0,011

Таблиця 4. Напруження в усій моделі

Модель з підпірною стінкою без паль	Модель з підпірною стінкою на пальному фундаменті
Напруження N_x , кН/м ²	
-1,18e+004 – 8,53e+003	-1,18e+004 – 8,33e+003
Напруження N_y , кН/м ²	
-1,07e+004 – 8,86e+003	-1,07e+004 – 8,66e+003
Напруження N_z , кН/м ²	
-2,77e+003 – 1,21e+003	-2,77e+003 – 1,17e+003

Таблиця 5. Напруження у моделі підпірної стінки

Кутова підпірна стінка без паль	Кутова підпірна стінка на пальному фундаменті
Напруження N_x , кН/м ²	
-7,15e+003 – 8,53e+003	-6,97e+003 – 8,32e+003
Напруження N_y , кН/м ²	
-7,87e+003 – 8,86e+003	-7,6e+003 – 8,66e+003
Напруження N_z , кН/м ²	
-1,6e+003 – 1,21e+003	-1,56e+003 – 1,17e+003

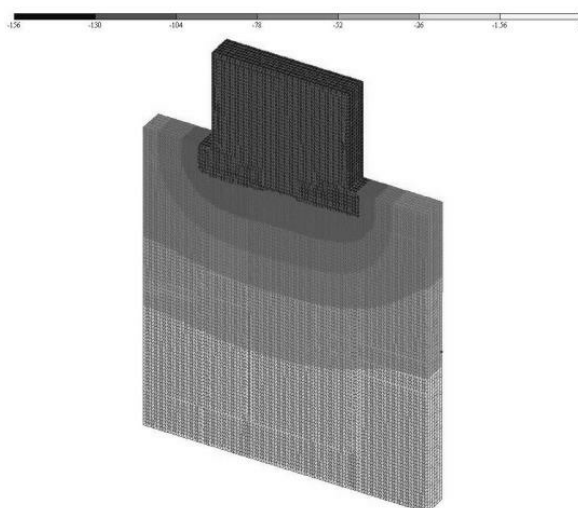


Рис. 4. Переміщення в усій моделі по осі z, мм

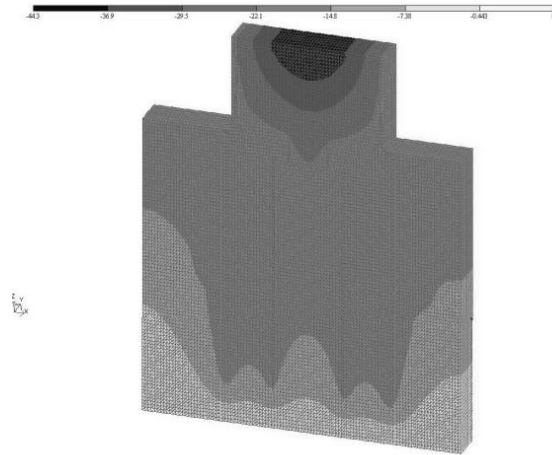


Рис. 5. Переміщення вусій моделі з паловим фундаментом по осі z, мм

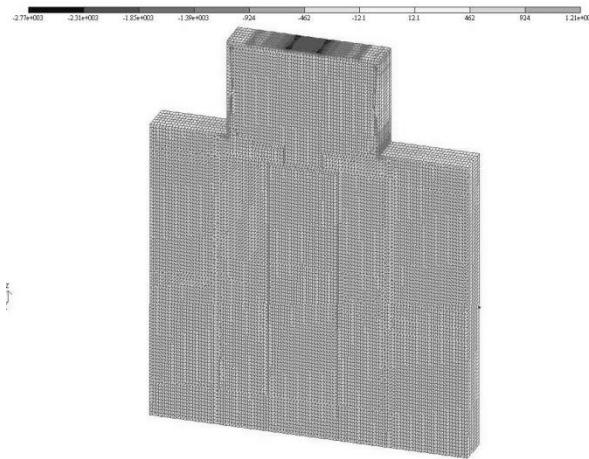


Рис. 6. Напруження вусій моделі N_z , кН/м²

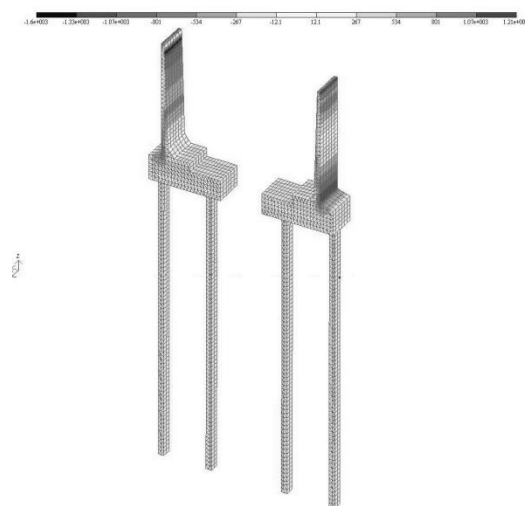


Рис. 7. Напруження в моделі підпірної стінки з палями N_z , кН/м²

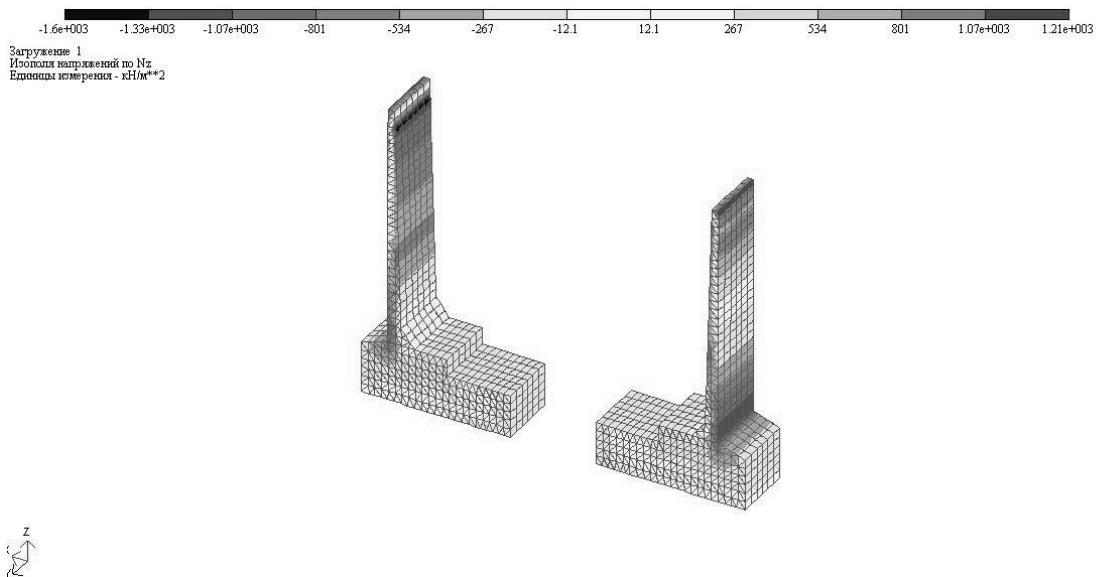


Рис. 8. Напряження в моделі підпірної стінки без паль $N_z, \text{кН/м}^2$

Висновки. Внаслідок виконаної роботи було одержано такі наукові результати:

- виявлено та проаналізовано особливості напружено-деформованого стану основи і споруди з тривимірним характером нелінійної взаємодії елементів системи «основа – пальовий фундамент – підпірна стінка» за допомогою моделі в програмному комплексі «LIRA»;

- досліджено вплив використання пальового фундаменту на напружено-деформований стан ґрунтової основи та формування меж стисненої зони при взаємодії пальового фундаменту з ґрунтовою основою;

- визначено, що основні напруження по осі z у моделях підпірної стінки з палями менші від напружень у моделях без паль в 1,33 рази, а переміщення – у 7,5 разів. Це підтверджує той факт, що вертикальна складова значно зменшується і роль підпірної стінки суттєво збільшується.

Література

1. Qiao, C.L. *Study on Action Mechanism of Piled Retaining Wall* / C.L. Qiao. – Chengdu, China: Sichuan University, 2004.
2. Gao, Z.H. *Experimental Study and Numerical Analysis of Mechanical Behavior of Piled Retaining Wall Structure* / Z.H. Gao. – Chengdu, China: Sichuan University, 2005.
3. Zhang, M. *Study on Designing Theory and Engineering Application of Piled Retaining Wall Structure* / M. Zhang. – Chengdu, China: Jiaotong University, 2007.
4. ЛИРА-САПР 2011: учебное пособие / Ю.В. Гензерский, Д.В. Медведев, О.И. Палиенко, В.П. Титок. – К.: Электронное издание, 2011. – 396 с.

Надійшла до редакції 09.10.2013
© В.Д. Петренко, М.А. Лісневський