



# AGRICULTURAL SCIENCES AND THE CURRENT STATE OF SCIENCE: FROM THEORY TO INNOVATIVE PRACTICE, ENVIRONMENTAL CHALLENGES AND SOLUTIONS

Collective monograph

ISBN 979-8-90383-426-6

DOI 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2

BOSTON(USA)-2026

ISBN – 979-8-90383-426-6

DOI – 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2

*Agricultural sciences and the current  
state of science: from theory to innovative  
practice, environmental challenges and  
solutions*

*Collective monograph*

*Boston 2026*

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

ISBN –979-8-90383-426-6

DOI – 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2

Authors – Вінюков О., Ліхушина Г., Бондарева О., Вискуб Р., Рибальченко А.М.,  
Доля К.В., Доля О.Є., Nahorni S., Nahorna T., Kis V.

## REVIEWER

Ivan Katerynychuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Education of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems of Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine.

Kostiantyn Dolia – Doctor of Engineering, Department of automobile and transport infrastructure, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”.

Published by Primedia eLaunch

<https://primediaelaunch.com/>

Text Copyright © 2026 by the International Science Group(isg-konf.com) and authors.

Illustrations © 2026 by the International Science Group and authors.

Cover design: International Science Group(isg-konf.com). ©

Cover art: International Science Group(isg-konf.com). ©

All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe and Ukraine. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science.

The recommended citation for this publication is:

**Agricultural sciences and the current state of science: from theory to innovative practice, environmental challenges and solutions:** collective monograph / Nahorni S., Nahorna T., Kis V. – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2026. 223 p. Available at : DOI – 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2

TABLE OF CONTENTS

1. AGRONOMY		
1.1	Вінюков О. <sup>1</sup> , Ліхушина Г. <sup>1</sup> , Бондарева О. <sup>1</sup> , Вискуб Р. <sup>1</sup>  КОМПЛЕКСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ АГРОБІОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЕКОЛОГІЧНО ЗБАЛАНСОВАНОГО ЗЕРНОВИРОБНИЦТВА В ЗОНІ ПІВНІЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ  <sup>1</sup> Донецька державна сільськогосподарська дослідна станція НААН, Покровськ, Україна	4
1.2	Рибальченко А.М. <sup>1</sup>  ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИЙОМИ ВИРОЩУВАННЯ СОЇ В ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ  <sup>1</sup> кафедра селекції, насінництва і генетики, Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна	18
2. ECOLOGY		
2.1	Доля К.В. <sup>1</sup> , Доля О.Є. <sup>2</sup>  ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЕНШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ  <sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна <sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна	60
2.1.1	ВСТУП	60
2.1.2	АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ	67
2.1.3	МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ	83
2.1.4	МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	86
2.1.5	ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ	137
2.1.6	ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	143
2.1.7	ВИСНОВКИ	152
3. LIVESTOCK		
3.1	Nahorny S. <sup>1</sup> , Nahorna T. <sup>2</sup> , Kis V. <sup>3</sup>  IMPROVEMENT OF MOISTURE CALCULATIONS OF MULTICOMPONENT SILAGE CROPS ON THE BASIS OF THE DEVELOPED FORMULAS  <sup>1</sup> Department of Technology and Breeding in Animal Husbandry, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine <sup>2</sup> Lebyazhy Lyceum, Kharkiv region, Ukraine <sup>3</sup> Department of Mechatronics, Life Safety and Quality Management, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine	156
REFERENCES		209

**SECTION 1. AGRONOMY**

DOI: 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2.1.1

**1.1 Комплексне застосування агробіологічних заходів для ефективного екологічно збалансованого зерновиробництва в зоні Північного Степу України**

Для Донецької області проблема забруднення навколишнього середовища стоїть надзвичайно гостро. За даними екологів у 2018 р. спостерігалось збільшення викидів і утворення відходів порівняно з 2017 р., що пов'язане з нарощуванням потужності промислових підприємств та переходом з газу на альтернативні види палива (зокрема на вугілля). У районах промислових комплексів ґрунт значною мірою забруднюється продуктами згорання палива, зола якого містить практично усі техногенні метали. Проведення антитерористичної операції на Сході країни, а з лютого 2022 р. повномасштабне вторгнення на територію нашої держави також завдало значних збитків найбільшому національному багатству країни – ґрунтам [1, 2]. Порушення екологічної рівноваги у природі впливає на такі важливі складові агроєкосистеми, як ґрунт і рослина. Тобто, останнім часом питання вирощування екологічно безпечної сільськогосподарської рослинної продукції разом з підвищенням врожайності набуло значної актуальності. Його вирішення сприятиме зростанню рівня здоров'я населення та якості життя взагалі і тому має суттєве соціальне значення.

Широке використання агентів біологічного впливу включає застосування нових ефективних та екологічно-безпечних стимуляторів росту, мікродобрив та мікробіологічних препаратів, які регулюють процеси життєдіяльності рослин та ґрунтової мікрофлори. Це сприяє мобілізації потенційних можливостей, закладених у геномі рослин природою і селекцією [3, 4].

До екологічно безпечних засобів технологій вирощування зернових колосових культур належить використання біологічних препаратів, які застосовуються як при обробці насіння, так і при догляді за посівами. Це дозволяє

не тільки зберегти високу продуктивність, але й сприяє підвищенню показників якості зерна [5 – 8].

На сьогоднішній день виявлено та вивчено біля 5000 різноманітних за походженням (мікробного, рослинного, хімічного) регуляторів росту, із них тільки біля ста, знайшли практичне застосування в сільськогосподарській практиці. Серед багаточисленних відомих регуляторів росту рослин найбільшу цінність у практиці сільського господарства отримали синтетичні інгібітори росту, стимулятори росту і так звані препарати «грунтополіпшувачі». Препарати з гормонами росту допомагають відновлювати рослини після стресових ситуацій, наприклад, у результаті приморозків. Крім того, ці препарати важливі для забезпечення рівномірного проростання насіння, що забезпечує дружність сходів і ріст рослин та формування високої врожайності [9 – 12].

У зв'язку з тенденцією до зменшення використання органічних добрив, мікробні препарати стають дуже важливими у природній регуляції взаємодії між рослиною та ґрунтом [13 – 16]. Вони екологічно безпечні та сприяють активізації фізіолого-біохімічних процесів у рослинах через складну взаємодію або синергію. Такі препарати підвищують стійкість рослин до захворювань і позитивно впливають на стан мікробного угруповання в ґрунтах, збільшуючи кількість корисної мікробіоти.

Інтенсифікація агропромислового виробництва за допомогою мінеральних добрив та пестицидів призводить до значного підвищення собівартості продукції, особливо в умовах стрімкого зростання цін на засоби виробництва через військові дії в Україні. Крім того, цей процес поступово порушує екологічні ланцюги в агроценозах, що веде до зменшення чисельності та різноманіття ґрунтової біоти.

Запобігти цьому можна шляхом пошуку та більш широкого використання у сільськогосподарському виробництві біологічних елементів технології вирощування, а вивчення ефективності таких заходів має великий науковий та практичний інтерес.

Протягом 2021–2025 рр. нами вивчалися різні варіанти застосування

біологічних регуляторів росту за різних фонів живлення при вирощуванні пшениці озимої сорту Перемога.

Погодні умови зими за роки досліджень були сприятливими для перезимівлі рослин пшениці озимої, що сприяло швидкому відновленню вегетації навесні, а також їх стабільному розвитку впродовж наступних етапів органогенезу.

Вплив запропонованих агротехнологічних елементів на ріст та розвиток рослин пшениці озимої демонструють біометричні показники, які були сформовані до завершення фази кушіння (табл. 1).

**Таблиця 1.**

Біометричні показники рослин пшениці озимої сорту Перемога наприкінці фази кушіння, 2021-2025 рр.

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Кількість стебел на рослині, шт.	Кількість вузлових коренів на рослині, шт.
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub>			
Контроль	54,3	2,2	3,0
Мікрогумін (обробка насіння)	54,6	2,3	3,5
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	55,2	2,4	3,8
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	55,1	2,3	3,4
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння)	54,9	2,5	3,7
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	55,3	2,2	3,7
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння)	55,2	2,3	3,8
Байкал (фаза кушіння)	54,4	2,2	3,1
Біоритм (фаза кушіння)	54,4	2,3	3,0
Екостимул (фаза кушіння)	54,4	2,1	3,0
Біогумус – 1000 кг/га			
Контроль	48,9	1,7	2,4
Мікрогумін (обробка насіння)	49,5	1,9	2,8
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	50,1	1,9	2,9
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	50,0	2,0	2,9
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння)	50,1	2,2	2,9
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	51,1	2,1	2,9

**Продовження таблиці 1.**

Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	50,0	1,9	3,0
Байкал (фаза кущіння)	49,0	1,9	2,4
Біоритм (фаза кущіння)	48,9	1,8	2,4
Екостимул (фаза кущіння)	49,0	1,7	2,3
НІР <sub>0,5</sub> (препарат)	0,13	0,04	0,05
НІР <sub>0,5</sub> (фон живлення)	0,06	0,02	0,02
НІР <sub>0,5</sub> (сукупна дія фону живлення та препарату)	0,18	0,05	0,07

Використання регуляторів росту підвищувала габітус рослин пшениці озимої порівняно з контрольним варіантом. На мінеральному фоні живлення найвищими рослини були на варіантах із обробкою насіння сумішшю препаратів Мікрогумін та Байкал (55,2 см), обробка насіння препаратом Байкал та обприскування посівів у фазі кущіння препаратом Екостимул (55,2 см), обробка насіння препаратом Байкал та обприскування посівів у фазі кущіння препаратом Біоритм (55,3 см).

На органічному фоні живлення рослини були нижчими, ніж на мінеральному фоні в середньому на 5 см. Найбільший габітус рослин за цього фону живлення був забезпечений варіантом з обробкою насіння препаратом Байкал та обприскуванням посівів у фазі кущіння препаратом Біоритм (51,1 см).

Одним з основних біометричних показників рослин пшениці озимої є кількість сформованих та збережених пагонів на одній рослині. Цей показник демонструє здатність рослин протистояти комплексу факторів, які виникають протягом етапів органогенезу.

Мінеральний фон живлення більш позитивно впливав на здатність рослин генерувати пагони підвищуючи цей показник в середньому на 0,5-0,6 шт на одній рослині порівняно з органічним фоном живлення.

Не залежно від фону живлення, найбільшу кількість пагонів було сформовано варіантом з обробкою насіння препаратом Мікрогумін та обприскуванням посівів препаратом Екостимул на початку фази кущіння (2,5 – на мінеральному фоні живлення та 2,2 – на органічному фоні живлення). Також високий коефіцієнт стеблостою виявлено у варіанті Мікрогумін + Байкал

(обробка насіння) на мінеральному фоні живлення – 2,4.

Не менш важливим біометричним показником, який демонструє ступінь пристосованості рослин до умов навколишнього середовища є розвиток вторинної кореневої системи. Саме тому проводився підрахунок кількості вторинних коренців на одній рослині наприкінці фази кущіння.

Використання мінерального фону живлення сприяло більш інтенсивному формуванню вторинних коренів у рослин пшениці озимої порівняно з органічним фоном. Використання мікробіологічних препаратів для обробки насіння, не залежно від фону живлення) збільшувало кількість вторинних коренів на одній рослині від 0,4 до 0,8 шт.

Остаточний вплив варіантів на формування біометричних показників рослин пшениці озимої визначався у фазі повної стиглості.

Фони живлення по різному впливали на біометричні показники рослин пшениці озимої протягом вегетації. Так, габітус рослин був вищим за мінерального фону живлення, що дорівнювало +2 см на контрольному варіанті порівняно з подібним варіантом при використанні органічного фону живлення (табл. 2).

**Таблиця 2.**

Біометричні показники рослин пшениці озимої сорту Перемога у фазі повної стиглості, 2021-2025 рр.

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Коефіцієнт загального кущіння	Коефіцієнт продуктивного кущіння
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub>			
Контроль	86,0	2,2	1,7
Мікрогумін (обробка насіння)	87,0	2,3	2,0
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	90,0	2,4	2,1
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	91,0	2,3	1,9
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	90,0	2,5	2,2
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	89,0	2,2	1,8
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	89,0	2,3	1,8
Байкал (фаза кущіння)	90,0	2,2	1,7

**Продовження таблиці 2.**

Біоритм (фаза кущіння)	88,0	2,3	2,0
Екостимул (фаза кущіння)	89,0	2,1	1,7
Біогумус - 1000 кг/га			
Контроль	84,0	1,7	1,4
Мікрогумін (обробка насіння)	87,0	1,9	1,6
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	88,0	1,9	1,5
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	88,0	2,0	1,7
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	89,0	2,2	1,9
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	86,0	2,1	1,9
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	87,0	1,9	1,6
Байкал (фаза кущіння)	88,0	1,9	1,6
Біоритм (фаза кущіння)	87,0	1,8	1,4
Екостимул (фаза кущіння)	87,0	1,7	1,3
НІР <sub>0,5</sub> (препарат)	0,28		
НІР <sub>0,5</sub> (фон живлення)	0,12		
НІР <sub>0,5</sub> (сукупна дія фону живлення та препарату)	0,39		

В досліді на фоні мінерального живлення варіанти, на яких використовували обробку насіння мікробіологічним препаратом Мікрогумін у поєднанні з препаратами Байкал, Біоритм та Екостимул, сприяли формуванню найбільшого габітусу рослин порівняно з контрольним варіантом (86,0 см), забезпечивши прибавку росту не менше 4-5 см. Подібного результату було досягнуто при одноразовому використанні препарату Байкал на початку фази кущіння.

На органічному фоні живлення максимальне значення висоти рослин пшениці озимої відмічено у варіанті за використання препарату Мікрогумін у поєднанні з препаратом Екостимул – 89 см.

При порівнянні впливу фонів живлення на ефективність препаратів, що вивчались, простежується закономірність більшого розкриття впливу фізіологічноактивних речовин за органічного фону живлення. Збільшення габітусу рослин за використання варіантів, що вивчались, порівняно з контролем було більшим саме на органічному фоні живлення, хоча в цілому рослини на мінеральному фоні живлення були вищими.

Вплив фонів живлення та препаратів, що вивчались, на ріст та розвиток рослин пшениці озимої протягом перших етапів органогенезу суттєво позначився на формуванні рослинами коефіцієнтів загального та продуктивного кущіння.

На мінеральному фоні живлення при обприскуванні рослин препаратами Байкал та Екостимул на початку фази кущіння були отримані показники загального та продуктивного кущіння однакові з контрольним варіантом (2,2 та 1,7 відповідно). Найкращу ефективність на ці показники було виявлено при використанні для обробки насіння препарату Мікрогумін, який, у поєднанні з іншими препаратами, забезпечив прибавку до контрольного варіанту за коефіцієнтом загального кущіння від 0,1 до 0,3, а за коефіцієнтом продуктивного кущіння – 0,5.

На мінеральному фоні живлення в середньому за роки досліджень найвищий показник загального та продуктивного кущіння на одиницю площі спостерігався на варіанті Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння) – 1125 шт./м<sup>2</sup> та 990 шт./м<sup>2</sup> відповідно.

Органічний фон живлення створював інші умови для розкриття потенціалу препаратів, що вивчались. Лише використання Екостимулу на початку фази кущіння сприяло отриманню подібних до контролю показників коефіцієнтів загального та продуктивного кущіння. Всі інші варіанти перевищували контрольний. Найвищі коефіцієнти загального та продуктивного кущіння (2,2 та 1,9) були забезпечені використанням Мікрогуміну для обробки насіння та Екостимулу для обприскування посівів на початку фази кущіння. Також зафіксовано високий коефіцієнт кущіння 1,9 у варіанті Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння).

На органічному фоні живлення на тому ж самому варіанті, що й на мінеральному фоні живлення, відмічене найвищі показники загального та продуктивного кущіння з одиниці площі – 990 шт./м<sup>2</sup> та 855 шт./м<sup>2</sup> відповідно.

Найвищий показник продуктивного кущіння у варіанті Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння) на органічному фоні живлення – 855 шт./м<sup>2</sup>.

Порівняння фонів між собою демонструє перевагу мінерального фону при

формуванні рослинами пшениці озимої біометричних показників.

Невід’ємною частиною сучасного технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур є використання біостимуляторів різного походження, які підвищують ефективність використання добрив, покращуючи умови живлення рослин та їх продуктивність. Застосування таких препаратів значно скорочує обсяги внесення мінеральних добрив, що суттєво знижує забруднення навколишнього середовища.

Спостереження за ростом та розвитком рослин ячменю ярого наприкінці кушення виявили значущої відмінності впливу фонів живлення на формування досліджуваних біометричних показників. Так, рослини мінерального фону були вищими за рослини органічного в середньому на 5,1 см (табл. 3).

**Таблиця 3.**

Біометричні показники рослин ячменю ярого сорту Бравий наприкінці фази кушіння, 2021-2025 рр.

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Кількість стебел на рослині, шт.	Кількість вузлових коренів на рослині, шт.
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub>			
Контроль	34,3	1,3	2,0
Мікрогумін (обробка насіння)	34,6	1,9	2,1
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	35,2	1,9	2,2
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	35,1	1,6	2,1
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння)	34,9	1,5	2,3
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	35,3	1,8	2,3
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння)	35,2	1,6	2,3
Байкал (фаза кушіння)	34,4	1,3	2,0
Біоритм (фаза кушіння)	34,4	1,3	1,9
Екостимул (фаза кушіння)	34,4	1,3	1,9
Біогумус - 1000 кг/га			
Контроль	28,9	1,2	1,9
Мікрогумін (обробка насіння)	29,5	1,6	2,2
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	30,1	1,5	2,3
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння)	30,0	1,5	2,2

**Продовження таблиці 3.**

Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	30,1	1,6	2,2
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	31,1	1,6	2,2
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	30,0	1,6	2,1
Байкал (фаза кущіння)	29,0	1,2	1,8
Біоритм (фаза кущіння)	28,9	1,2	1,8
Екостимул (фаза кущіння)	29,0	1,1	1,8
НІР <sub>0,5</sub> (препарат)	0,80	0,009	0,050
НІР <sub>0,5</sub> (фон живлення)	0,36	0,004	0,023
НІР <sub>0,5</sub> (сукупна дія фону живлення та препарату)	1,14	0,012	0,071

За показником висоти рослин виділено варіант Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння), в якому на обох фонах живлення відмічене максимальне значення висоти рослин ячменю наприкінці фази кущення – 35,3 см (мінеральне живлення) та 31,1 см (органічне живлення). В межах допустимої похибки виділені й інші варіанти високорослості ячменю: Мікрогумін + Байкал (обробка насіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння), Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння) 34,9-35,2 см на мінеральному фоні живлення та 30,0-30,1 см на органічному фоні живлення.

Погодні умови в роки проведення досліджень не сприяли значному кущінню рослин ячменю ярого. Проте, використання запропонованих варіантів, що вивчались, сприяло підвищенню коефіцієнту кущіння у рослин не залежно від фону живлення.

Найвищим коефіцієнт кущіння (1,9) на мінеральному фоні живлення був за використання препарату Мікрогумін для обробки насіння, а також сумісне використання препаратів Мікрогумін та Байкал для обробки насіння. Використання регуляторів росту для обприскування посівів на початку фази кущіння істотно не вплинули на формування додаткових пагонів рослинами.

Більш суттєвий вплив на цей показник продемонстрували фони живлення. Різниця між мінеральним та органічним фонами на контрольних варіантах

дорівнювала 0,2 пагони на одній рослині на користь мінерального.

Високий рівень формування кількості пагонів (1,6 шт./рослину) на органічному фоні живлення сприяло використанню мікробіологічних препаратів наступних варіантів: Мікрогумін (обробка насіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння), Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння) та Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння).

Кількість вузлових коренів на рослині ячменю ярого також залежала від фону живлення та застосування препаратів, що вивчались.

Фони живлення майже однаково впливали на формування вузлових коренів. На органічному фоні в середньому на 0,1 шт. було менше вузлових коренів ніж на мінеральному фоні.

Достовірно вищий показник кількості вторинних коренів (2,3 шт./рослину) в досліді на мінеральному живленні виявлено у варіантах Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння), Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння) та Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння). В досліді з органічним фоном живлення найвищий даний показник (2,3 шт./рослину) зафіксовано у варіанті Мікрогумін + Байкал (обробка насіння). В межах допустимої похибки високий показник кількості вузлових коренів (2,2 шт./рослину) забезпечили використання препаратів в таких варіантах: Мікрогумін (обробка насіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кушіння) та Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння).

На мінеральному фоні живлення, не залежно від варіанту, рослини ячменю ярого відзначились надмірним розвитком габітусу у фазі повної стиглості. Порівняно з органічним фоном рослини були вищими в середньому на 8 см (табл. 4). Найбільший габітус рослин (прибавка порівняно з контролем склала 5-7 см) забезпечували наступні варіанти використання препаратів: обробка насіння Мікрогуміном, поєднання Мікрогуміну та Байкалу при обробці зерна, обробка зерна Мікрогуміном з подальшою обробкою по зеленому листу у фазу кущення Екостимулом.

**Таблиця 4.**

Біометричні показники рослин ячменю ярого сорту Бравий у фазі повної стиглості, 2021-2025 рр.

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Коефіцієнт загального кущіння	Коефіцієнт продуктивного кущіння
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub>			
Контроль	66,7	1,4	1,3
Мікрогумін (обробка насіння)	71,7	1,9	1,6
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	72,0	1,7	1,6
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	70,7	1,7	1,5
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	73,7	1,6	1,5
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	69,7	1,7	1,7
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	68,7	1,5	1,5
Байкал (фаза кущіння)	69,0	1,9	1,8
Біоритм (фаза кущіння)	68,7	1,5	1,5
Екостимул (фаза кущіння)	67,7	1,6	1,5
Біогумус - 1000 кг/га			
Контроль	58,3	1,3	1,2
Мікрогумін (обробка насіння)	61,0	1,6	1,2
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	59,7	1,5	1,3
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	59,0	1,5	1,3
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	61,3	1,5	1,2
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	60,3	1,5	1,3
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	63,7	1,5	1,2
Байкал (фаза кущіння)	62,7	1,5	1,3
Біоритм (фаза кущіння)	60,7	1,4	1,2
Екостимул (фаза кущіння)	58,7	1,5	1,2
НІР <sub>0,5</sub> (препарат)	2,67	0,042	0,031
НІР <sub>0,5</sub> (фон живлення)	1,19	0,019	0,014
НІР <sub>0,5</sub> (сукупна дія фону живлення та препарату)	3,77	0,060	0,043

Органічний фон сприяв формуванню найбільшого габітусу при сумісному використанні обробки насіння Байкалом та обприскування посівів на початку фази кущіння препаратом Екостимулом (прибавка порівняно з контролем – 5 см).

Також відмічене в межах допустимої похибки високий показник висоти рослин (62,7 см) у варіанті обробки посіву у фазу кущення Байкалом.

На мінеральному фоні живлення найвищі коефіцієнти загального кушіння були на варіантах з обробкою насіння Мікрогуміном та обробкою посіву у фазу кущення Байкалом (1,9). Кращі коефіцієнти продуктивного кушіння (1,7-1,8) були отримані на варіантах: Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння) та Байкал (фаза кушіння).

За органічного фону живлення суттєва відмінність показника коефіцієнту загального кущення була при обробці насіння Мікрогуміном (1,6). За показником коефіцієнта продуктивного кущення всі варіанти застосування препаратів забезпечили рівень 1,2-1,3.

Додаткове живлення, яке створювалось за рахунок використання мінеральних та органічних добрив, відіграло значний вплив на формування рослинами стебел. А стимулювання фізіологічних процесів регуляторами росту та мікробіологічними препаратами забезпечувало рослини необхідними мікроелементами у найбільш критичні періоди розвитку.

За ознаками загального та продуктивного стеблостою на одиницю площі на мінеральному фоні живлення виявлено найвищі показники у варіанті із застосуванням препарату Байкал у фазу кушіння – 763 шт./м<sup>2</sup> та 710 шт./м<sup>2</sup> відповідно. Також чисельний загальний стеблостій спостерігався на варіанті із обробкою зерна Мікрогуміном – 763 шт./м<sup>2</sup>.

Органічний фон живлення по своєму розкривав властивості препаратів, що вивчались. Так, найвищі показники загального та продуктивного стеблостою з одиниці площі відмічено у наступних варіантах застосування препаратів: Мікрогумін (обробка насіння) – 644 шт./м<sup>2</sup> загального стеблостою; Мікрогумін + Байкал (обробка насіння), Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння), Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кушіння) та Байкал (фаза кушіння) – 518 шт./м<sup>2</sup> продуктивного стеблостою.

Найбільш істотний прояв ефективності запропонованих варіантів відбився на врожайності зерна пшениці озимої та ячменю ярого (табл. 5).

**Таблиця 5.**

Урожайність зерна пшениці озимої сорту Перемога та ячменю ярого сорту Бравий, 2021–2025 рр.

Варіант досліджу	Урожайність оз. пшениці, т/га	Прибавка		Урожайність яр. ячменю, т/га	Прибавка	
		т/га	%		т/га	%
1	2	3	4	5	6	7
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub>						
Контроль	3,6	-	-	3,3	-	-
Мікрогумін (обробка насіння)	3,6	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	3,7	0,1	2,8	3,6	0,3	9,1
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	4,5	0,8	22,9	3,2	-0,1	-3,0
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	4,0	0,4	11,0	2,8	-0,5	15,2
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	4,1	0,5	12,8	2,9	-0,4	12,1
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	4,0	0,3	9,2	3,5	0,2	6,1
Байкал (фаза кущіння)	3,7	0,0	0,9	3,1	-0,2	-6,1
Біоритм (фаза кущіння)	3,6	0,0	-0,9	3,3	0,0	0,0
Екостимул (фаза кущіння)	3,6	0,0	-0,9	2,8	-0,5	15,2
Біогумус - 1000 кг/га						
Контроль	3,1	-	-	2,5	-	-
Мікрогумін (обробка насіння)	3,1	0,0	-1,1	2,5	0,0	0,0
Мікрогумін + Байкал (обробка насіння)	3,2	0,1	2,2	2,7	0,2	8,0
Мікрогумін (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	3,4	0,3	8,6	2,9	0,4	16,0
Мікрогумін (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	3,5	0,4	12,9	3,0	0,5	20,0
Байкал (обробка насіння) + Біоритм (фаза кущіння)	3,3	0,2	5,4	2,9	0,4	16,0
Байкал (обробка насіння) + Екостимул (фаза кущіння)	3,2	0,1	4,3	2,8	0,3	12,0
Байкал (фаза кущіння)	3,0	-0,1	-2,2	2,6	0,1	4,0
Біоритм (фаза кущіння)	3,1	0,0	-1,1	2,7	0,2	8,0
Екостимул (фаза кущіння)	2,9	-0,2	-6,5	2,6	0,1	4,0
НІР <sub>0,5</sub> (препарат)	0,24			0,15		
НІР <sub>0,5</sub> (фон живлення)	0,11			0,07		
НІР <sub>0,5</sub> (сукупна дія фону живлення та препарату)	0,34			0,21		

Використання регуляторів росту сприяє підвищенню економічної ефективності виробництва. Це зумовлено зменшенням витрат на мінеральні

добрива та зменшенням пестицидного навантаження, оскільки знижується необхідність в застосуванні великих доз різних агрохімікатів. Такий підхід сприяє біологізації сільськогосподарського виробництва, тобто переходу до більш природних та екологічно безпечних методів ведення господарства. Застосування регуляторів росту є важливим етапом у вдосконаленні сучасних агротехнологій та підвищенні стійкості та продуктивності сільськогосподарських культур.

Економічна ефективність вирощування зернових культур, зокрема пшениці озимої та ячменю ярого, значно залежить від використання різних фонів живлення та біопрепаратів. Експерименти показали, що на фоні живлення  $N_{30}P_{30}$  та за використання препаратів Мікрогумін + Байкал при інокуляції насіння, рентабельність вирощування пшениці озимої склала 33,8 %, ячменю ярого – 23,2 %. У той же час, при застосуванні біогумусу 1000 кг/га рентабельність знизилася (12,4 % для пшениці озимої та 2,4 % для ячменю ярого).

Таким чином, комплексне застосування агробіологічних заходів для ефективного, екологічно збалансованого зерновиробництва в ґрунтово-кліматичних умовах Північного Степу України забезпечує стабілізацію виробництва високоякісної зернової продукції пшениці озимої та ячменю ярого:

- використовувати найбільш адаптовані сорти пшениці озимої – Перемога та ячменю ярого – Бравий, які формують продуктивність рослин на рівні 4,5 т/га (пшениця озима) та 3,5 т/га (ячмінь ярий);

- застосовувати мінеральний фон живлення  $N_{30}P_{30}K_{30}$  при вирощуванні пшениці озимої, що забезпечує підвищення продуктивності рослин порівняно з контролем на 22,9 %;

- застосовувати органічний фон живлення Біогумус (1 т/га), який сприяє посиленню властивостей регулятора росту та дозволяє підвищити рівень врожайності ячменю ярого на 20,0 % порівняно з контрольним варіантом;

- здійснювати інокуляцію насіння зернових культур мікробіологічними препаратами Мікрогумін (1,0 кг/т) та Байкал (2,0 л/т);

- проводити обприскування посівів зернових культур на початку фази куцїння препаратами Екостимул (1,0 л/га) та Біоритм (1,5 л/га).

## **1.2 Технологічні прийоми вирощування сої в Лівобережному Лісостепу України**

Соя є однією з найважливіших зернобобових і олійних культур у світовому сільському господарстві. Вона має велике продовольче, кормове, агротехнічне та економічне значення завдяки високому вмісту білка й олії, а також здатності покращувати родючість ґрунту. Насіння сої містить у середньому 35-45% білка та 18-25% олії, що робить її цінною сировиною для харчової промисловості.

Соевий білок характеризується високою біологічною цінністю та збалансованим амінокислотним складом. Із сої виготовляють олію, борошно, білкові концентрати та інші продукти харчування. Завдяки високій поживності сою широко використовують у виробництві дієтичного та вегетаріанського харчування [17].

Соя є важливим джерелом кормового білка для тваринництва. Соевий шрот і макуха широко застосовуються у виробництві комбикормів для великої рогатої худоби, свиней і птиці. Використання соєвих кормів сприяє покращенню якості продукції тваринництва [18].

Як зернобобова культура соя здатна вступати в симбіоз із бульбочковими бактеріями та фіксувати атмосферний азот. Це сприяє покращенню азотного балансу ґрунту, зменшенню потреби у внесенні мінеральних азотних добрив і підвищенню родючості ґрунтів. Соя є добрим попередником для багатьох сільськогосподарських культур у сівозміні.

Соя належить до високорентабельних культур і має стабільний попит на внутрішньому та світовому ринках. Зростання виробництва сої в Україні пов'язане з високою експортною привабливістю культури та широкими можливостями її переробки. Вирощування сої сприяє розвитку аграрного сектору та підвищенню економічної ефективності сільськогосподарських підприємств.

Вирощування сої є важливим елементом біологізації землеробства. Біологізація землеробства є напрямом ведення сільського господарства, що передбачає широке використання біологічних факторів для підвищення родючості ґрунту, продуктивності культур і зменшення негативного впливу на довкілля. Основною метою біологізації є зниження залежності від хімічних засобів виробництва та забезпечення екологічної рівноваги в агроєкосистемах. Завдяки здатності до азотфіксації культура сої знижує антропогенне навантаження на довкілля, сприяє екологізації аграрного виробництва та підтриманню сталого розвитку агроєкосистем. Соя в структурі сівозміни покращує структуру ґрунту, підвищує його біологічну активність і родючість. Соя є добрим попередником для зернових та інших сільськогосподарських культур. Соя є універсальною культурою, яка поєднує високу поживну цінність, економічну ефективність та екологічну значущість, що визначає її важливу роль у сучасному сільському господарстві [19].

Соя є теплолюбною та вологолюбною культурою короткого дня, яка має підвищені вимоги до умов вирощування. Ріст і розвиток рослин сої значною мірою залежить від температурного режиму, забезпечення вологою та ґрунтово-кліматичних умов.

Для проростання насіння мінімальна температура ґрунту повинна становити 8-10 °С, однак оптимальною є температура 12-14 °С. За таких умов сходи з'являються швидко та рівномірно. Найкраще соя росте і розвивається при температурі повітря 20-25 °С.

У період цвітіння та формування бобів оптимальна температура повітря 22-28 °С. Зниження температури нижче 15 °С уповільнює ріст рослин. Водночас надмірно високі температури, особливо понад 35 °С, негативно впливають на запилення. Оптимальні температурні умови протягом вегетації сприяють активному фотосинтезу, формуванню бульбочок на коренях та накопиченню білка й олії в насінні.

Соя потребує достатнього забезпечення вологою протягом усього періоду вегетації. Для проростання насіння необхідно 130-160% води від його маси.

Найбільшу потребу у волозі рослини мають у фазах бутонізації, цвітіння та наливу бобів. Нестача вологи в цей період призводить до опадання квіток і бобів, зменшення кількості насіння та зниження врожайності. Водночас надлишок вологи також є небажаним, оскільки погіршує аерацію ґрунту, пригнічує діяльність бульбочкових бактерій і сприяє розвитку хвороб [20].

Соя культурна (*Glycine max* (L.) Merr.) є однією з найдавніших сільськогосподарських культур світу. Батьківщиною її вважають Східну Азію, зокрема територію сучасного Китаю, де сою почали вирощувати понад 4-5 тисяч років тому. В Китаї соя тривалий час була однією з основних продовольчих культур. Соя культурна походить від дикорослої форми – *Glycine soja*, яка й нині трапляється у природних умовах Китаю, Кореї, Японії та інших країн Східної Азії. У процесі тривалої селекції були створені форми сої з крупнішим насінням, вищою врожайністю та кращими господарськими властивостями.

З Китаю культура поступово поширилася до Японії, Кореї, Індії та інших країн Азії. У Європу сою було завезено у XVIII столітті, проте широкого поширення вона набула значно пізніше. У XX столітті соя стала однією з провідних світових культур завдяки високому вмісту білка й олії та широкому використанню у харчовій, кормовій галузях.

В Україні сою почали вирощувати наприкінці XIX століття, однак значного поширення культура набула лише в останні десятиліття у зв'язку зі зростанням попиту на рослинний білок та розвитком сучасних технологій вирощування [21].

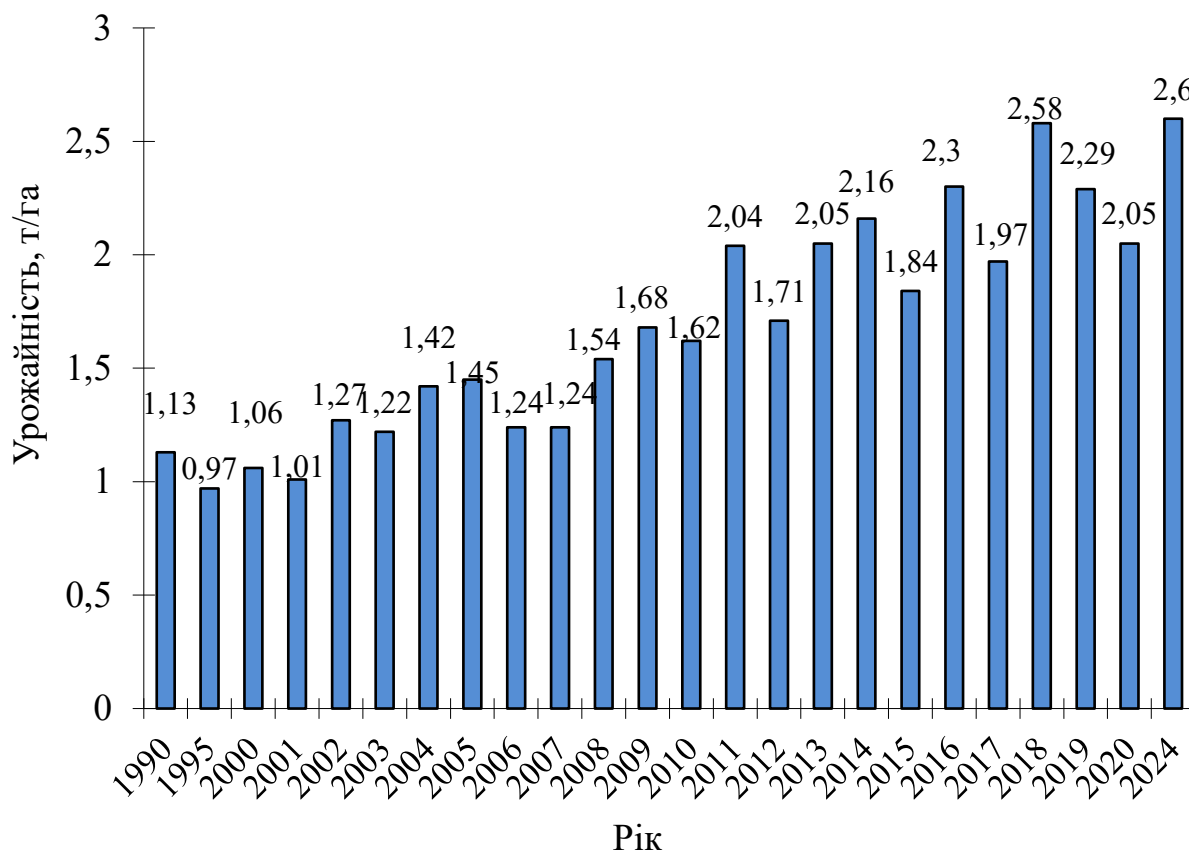
Світове виробництво сої постійно зростає у зв'язку зі збільшенням попиту на рослинний білок. Основними виробниками сої у світі є Бразилія, США та Аргентина, які забезпечують більшу частину світового валового збору культури. Значні площі сої також зосереджені в Китаї, Індії та Парагваї. Урожайність сої значною мірою залежить від ґрунтово-кліматичних умов, рівня агротехніки, сортових особливостей та забезпечення вологою. У провідних країнах-виробниках середня урожайність сої зазвичай становить 2,8–4,0 т/га, а за інтенсивних технологій може перевищувати 5 т/га [22].

В Україні соя є стратегічно важливою культурою та однією з основних експортно орієнтованих зернобобових культур. Вирощування сої активно розвивається завдяки високому попиту на світовому ринку, економічній ефективності та добрим ґрунтово-кліматичним умовам для її вирощування.

Упродовж тривалого часу рівень урожайності сої в Україні залишався невисоким, а її зростання відбувалося повільними темпами. Лише у 2011 році середній показник урожайності вперше перевищив межу 2 т/га і досяг 2,04 т/га. До 2016 року урожайність культури зростає з 1,13 до 2,3 т/га. Найвищий середній показник було зафіксовано у 2018 році – 2,58 т/га. Досягнення таких результатів стало можливим завдяки ефективній роботі українських селекціонерів, використанню адаптивного вихідного матеріалу.

У 2020 році найвищу врожайність сої отримали в Закарпатській області — у середньому 3,34 т/га. До регіонів-лідерів також увійшли Запорізька та Херсонська області, де цей показник становив відповідно 3,11 і 3,07 т/га. Упродовж 2018-2020 років спостерігалася стійка тенденція до підвищення врожайності сої [23].

Середній рівень урожайності в цей період коливався в межах 2,05-2,58 т/га і жодного разу не опускався нижче 2 т/га. У 2024 році було зафіксовано рекордний рівень урожайності насіння сої – 2,6 т/га (рис 1.).



**Рисунок 1.** Середня урожайність насіння сої в Україні, т/га (1990-2024 рр.)

Джерело рисунка: [24, 25].

Посівні площі в Україні під соєю збільшувалися поступово. У 2024 році найбільші посівні площі соєю були в Полтавській області – 215 тис. га, Хмельницькій – 212 тис. га, Житомирській – 150 тис. га, Вінницькій – 143 тис. га та Київській – 140 тис. га. Загалом на ці регіони припадала майже половина всіх посівів сої в Україні. У 2024 році посівні площі під культурою досягли близько 2,7 млн га, а валове виробництво сої в Україні перевищило 6 млн т. Підвищення врожайності можливе завдяки вдосконаленню технологій вирощування, добору адаптованих сортів, впровадженню інноваційних рішень, а також поліпшенню агротехнічних заходів [26].

Дотримання комплексу технологічних заходів сприяє підвищенню ефективності вирощування сої, покращенню економічних показників виробництва та стабільності врожайності, навіть, за нестабільних погодних умов.

У сучасних умовах зміни клімату особливо актуальним є впровадження ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій, які дозволяють максимально реалізувати потенціал культури в умовах Лівобережного Лісостепу України. Ефективність вирощування сої в умовах значною мірою залежить від дотримання науково-обґрунтованої технології, адаптованої до ґрунтово-кліматичних умов регіону.

Кліматичні умови Лівобережного Лісостепу характеризуються достатнім тепловим забезпеченням, проте нестійким рівнем зволоження, особливо в окремі періоди вегетації. У зв'язку з цим особливого значення набуває правильний підбір сортів сої, які повинні поєднувати високу продуктивність та адаптивність. Використання сучасних сортів сої дозволяє більш повно реалізувати генетичний потенціал культури та забезпечити стабільний рівень урожайності.

Для Лівобережного Лісостепу України характерний помірно континентальний клімат. Найнижчі температурні показники спостерігаються у січні, коли середньодобова температура повітря становить від  $-4,5$  до  $-5,5$  °С, тоді як найтеплішим місяцем є липень із середньою температурою 21-22 °С. Середньорічна температура повітря коливається в межах 6-8 °С. Річна кількість опадів становить близько 450-500 мм, однак їх розподіл протягом року є нерівномірним. Сума активних температур понад 10 °С досягає 2700-2900 °С, що забезпечує сприятливі умови для досягання основних сільськогосподарських культур. Ґрунтово-кліматичні умови регіону є сприятливими для вирощування ранньостиглих і середньостиглих сортів сої та дають можливість отримувати стабільні й високі врожаї культури.

Соя є культурою з високими вимогами до вологозабезпечення, тому основні площі її вирощування зосереджені у так званому соєво-кукурудзяному поясі України. До нього належать області Лісостепової зони: Вінницька, Київська, Полтавська, Сумська, Тернопільська, Харківська, Хмельницька, Черкаська та Чернівецька. Крім того, значні площі сої розміщені у районах Степу з наближеними до Лісостепу умовами, зокрема у Кіровоградській, Дніпропетровській, Одеській та Миколаївській областях, а також у південних

районах Полісся – Житомирської, Чернігівської, Рівненської та Волинської областей, які характеризуються лісостеповими природними умовами. Ці території мають сприятливе поєднання ґрунтових, теплових, світлових і водних ресурсів, необхідних для ефективного вирощування сої та формування високої врожайності культури [27-29].

Соя займає важливе місце у сучасних сівозмінах завдяки своїм біологічним та агротехнічним особливостям. Соя, як зернобобова культура, позитивно впливає на родючість ґрунту, покращує його азотний баланс і є добрим попередником для багатьох сільськогосподарських культур. Завдяки здатності культури до азотфіксації, після вирощування сої у ґрунті залишається значна кількість біологічного азоту, який може використовуватися наступними культурами, що будуть вирощуватися на цьому полі. Завдяки цьому відбувається зменшення потреби у внесенні мінеральних азотних добрив та підвищує ефективність сівозміни [30].

Соя є цінним попередником для зернових культур, зокрема пшениці озимої, ячменю, кукурудзи. Після вирощування сої покращується фітосанітарний стан ґрунту, зменшується засміченість полів, а також створюються сприятливі умови для росту і розвитку наступних культур. Крім того, соя залишає після себе значну кількість органічних решток, що позитивно впливає на структуру ґрунту та вміст гумусу.

При вирощуванні сої важливе значення має правильний підбір попередників. Найкращими попередниками є озимі та ярі зернові культури, які рано звільняють поле та дозволяють якісно підготувати ґрунт до сівби. Не рекомендується розміщувати сою після інших зернобобових культур і соняшнику через накопичення спільних хвороб, шкідників та виснаження ґрунту.

Повертати сою на попереднє місце у сівозміні рекомендується не раніше, ніж через 3-4 роки. Дотримання такого чергування культур сприяє зменшенню поширення корневих гнилей, бактеріозів та інших хвороб, а також забезпечує стабільний рівень урожайності [31].

У сучасних системах землеробства соя є важливим елементом біологізації сівозмін, оскільки, сприяє екологізації аграрного виробництва, підвищенню родючості ґрунтів та покращенню економічної ефективності господарств. Раціональне розміщення сої у сівозміні дозволяє максимально реалізувати її продуктивний потенціал і забезпечити стабільність агроєкосистем.

Система обробітку ґрунту під сою є одним із важливих елементів технології вирощування культури, оскільки, від неї значною мірою залежать водний, повітряний і поживний режими ґрунту, рівень забур'яненості посівів та формування врожайності. Соя є досить вибагливою культурою до ґрунтових умов, тому для отримання високих і стабільних урожаїв важливе значення має правильний вибір ґрунтів для її вирощування. Найкраще соя росте на родючих, добре структурованих ґрунтах із достатнім вмістом гумусу, нейтральною або слабокислою реакцією ґрунтового розчину та хорошою водо- і повітропроникністю [32].

Найсприятливішими для вирощування сої є чорноземи типові та чорноземи опідзолені, що характеризуються високою родючістю, добрим запасом поживних речовин і оптимальними фізичними властивостями; темно-сірі та сірі лісові ґрунти – за умови достатнього удобрення та належного обробітку забезпечують високий рівень урожайності. Оптимальними для культури є ґрунти з реакцією середовища рН 6,0-7,0. На кислих ґрунтах погіршується діяльність бульбочкових бактерій і знижується ефективність азотфіксації, тому такі ґрунти потребують вапнування. Малоприсадибними для вирощування сої є важкі глинисті ґрунти з надмірним ущільненням, заболочені та перезволожені ґрунти, легкі піщані ґрунти з низькою вологостійкістю та бідним поживним режимом, засолені ґрунти [33].

Соя погано переносить застій води, оскільки, це негативно впливає на розвиток кореневої системи та бульбочкових бактерій. За надлишку вологи посилюється розвиток грибкових і бактеріальних хвороб, зокрема, фузаріозу, пероноспорозу, бактеріозу. Тривале перезволоження може призводити до пожовтіння листків, опадання квіток і бобів, а також до зрідження посівів.

Водночас культура потребує достатнього забезпечення вологою в критичні періоди розвитку, а саме під час цвітіння та формування бобів.

В Україні найбільш сприятливі ґрунтові умови для вирощування сої зосереджені у Лісостепу та на Поліссі, де поширені родючі чорноземи й сірі лісові ґрунти. У степових районах ефективність вирощування сої значною мірою залежить від рівня вологозабезпечення та застосування адаптованих технологій.

Основним завданням обробітку ґрунту є створення оптимальних умов для проростання насіння, розвитку кореневої системи та накопичення і збереження вологи. Обробіток ґрунту під сою повинен проводитися з урахуванням попередника, типу ґрунту, ступеня його ущільнення, забур'яненості та кліматичних умов регіону. Після збирання попередника зазвичай проводять лущення стерні, яке сприяє збереженню вологи, знищенню бур'янів і падалиці, а також створює умови для проростання насіння бур'янів з подальшим їх знищенням [34].

Основним видом основного обробітку ґрунту під сою традиційно є оранка на глибину 20-25 см. Вона забезпечує розпушення орного шару, покращує аерацію ґрунту, сприяє накопиченню вологи та розвитку кореневої системи рослин. На полях із високим рівнем забур'яненості або значним ущільненням ґрунту оранка є найбільш ефективним способом підготовки ґрунту [35, 36].

У сучасних умовах дедалі більшого поширення набувають мінімальний і безполицевий обробітки ґрунту, які сприяють зменшенню втрат вологи, збереженню структури ґрунту та зниженню енергетичних витрат. Мінімізація обробітку є особливо актуальною для регіонів недостатнього зволоження, де важливе значення має збереження запасів продуктивної вологи.

Мінімізація обробітку ґрунту є одним із сучасних напрямів удосконалення технології вирощування сої, який спрямований на збереження родючості ґрунту, зменшення енергетичних витрат та ефективніше використання вологи. Основою такого підходу є скорочення кількості та глибини механічних обробітків ґрунту із максимальним збереженням рослинних решток на поверхні поля. Застосування мінімального обробітку під сою має особливе

значення в умовах недостатнього та нестійкого зволоження, оскільки сприяє накопиченню й збереженню продуктивної вологи у ґрунті. Рослинні рештки на поверхні зменшують випаровування води, захищають ґрунт від перегрівання та водної й вітрової ерозії.

Мінімалізація обробітку передбачає використання поверхневого або мілкового розпушування без обертання скиби, а також застосування комбінованих агрегатів, які за один прохід виконують кілька технологічних операцій. Така система дозволяє зменшити ущільнення ґрунту, скоротити витрати пального та підвищити економічну ефективність вирощування культури [37].

Важливою перевагою мінімального обробітку є покращення біологічної активності ґрунту. Збереження органічних решток сприяє накопиченню гумусу, активізації діяльності ґрунтових мікроорганізмів і створенню сприятливих умов для розвитку бульбочкових бактерій, які забезпечують процес біологічної фіксації азоту у сої. Разом із тим мінімалізація обробітку потребує ефективної системи контролю бур'янів, оскільки за скорочення механічного обробітку може підвищуватися рівень забур'яненості посівів. Тому, у таких технологіях важливе значення мають правильна сівозміна, використання гербіцидів та якісний передпосівний обробіток.

Ефективність мінімального обробітку значною мірою залежить від типу ґрунту, попередника, рівня зволоження та агротехнічного забезпечення господарства. Найкращі результати така система демонструє на структурних ґрунтах із достатнім вмістом органічної речовини [38].

Технологія No-till (нульовий обробіток ґрунту) при вирощуванні сої є перспективним напрямом сучасного землеробства, який забезпечує збереження родючості ґрунту, підвищення ефективності використання вологи, зниження енергетичних витрат та екологізацію аграрного виробництва.

Технологія No-till є сучасною ресурсозберігаючою системою землеробства, яка передбачає вирощування сільськогосподарських культур без механічного обробітку ґрунту. За цієї технології насіння сої висівають безпосередньо у необроблений ґрунт, вкритий рослинними рештками попередньої культури.

Основною метою технології No-till є збереження природної структури ґрунту, мінімізація втрат вологи, захист ґрунту від ерозії та зменшення виробничих витрат. Для вирощування сої така система має особливе значення в умовах недостатнього зволоження та змін клімату.

Однією з головних переваг No-till є ефективне накопичення і збереження продуктивної вологи. Рослинні рештки на поверхні поля виконують роль мульчі, яка зменшує випаровування води, захищає ґрунт від перегрівання та сприяє покращенню водного режиму, що особливо важливо для сої у критичні фази розвитку – під час цвітіння та формування бобів.

Технологія No-till позитивно впливає на агрофізичні властивості ґрунту. Збереження органічних решток сприяє накопиченню гумусу, активізації мікробіологічних процесів та покращенню структури ґрунту. Крім того, створюються сприятливі умови для розвитку бульбочкових бактерій, що підвищує ефективність біологічної фіксації азоту. Важливим елементом технології є правильний підбір попередників і дотримання сівозміни. Найкращими попередниками для сої у системі No-till є зернові колосові культури, які залишають достатню кількість рослинних решток і забезпечують сприятливий фітосанітарний стан поля.

Особливу увагу за технології No-till приділяють контролю бур'янів. Через відсутність механічного обробітку ґрунту основну роль у боротьбі з бур'яною рослинністю відіграє система гербіцидного захисту. Ефективне застосування гербіцидів у поєднанні з правильною сівозміною дозволяє підтримувати посіви сої у чистому стані. Для сівби сої за технологією No-till використовують спеціальні сівалки, здатні якісно висівати насіння у необроблений ґрунт через шар рослинних решток. Важливе значення має рівномірне загортання насіння та забезпечення його контакту з ґрунтом для отримання дружних сходів.

Разом із перевагами технологія No-till має певні особливості та труднощі. На початкових етапах впровадження можливе ущільнення верхнього шару ґрунту, збільшення забур'яненості або повільніше прогрівання ґрунту навесні. Ефективність системи значною мірою залежить від рівня технологічного

забезпечення господарства та правильного дотримання всіх елементів технології [39, 40].

Передпосівний обробіток ґрунту спрямований на створення дрібногрудочкуватого посівного шару, вирівнювання поверхні поля та знищення проростків бур'янів. Соя потребує добре підготовленого ґрунту, оскільки насіння повільно проростає, а молоді рослини на початкових етапах розвитку є чутливими до ущільнення ґрунту та забур'яненості. Якісний передпосівний обробіток сприяє рівномірному загортанню насіння на задану глибину та забезпечує швидке отримання сходів [41].

Ранньовесняне боронування проводять для закриття вологи, руйнування ґрунтової кірки та вирівнювання поверхні поля. Ранньовесняне боронування сприяє зменшенню випаровування вологи та покращує аерацію верхнього шару ґрунту. Передпосівну культивуацію здійснюють на глибину загортання насіння – 4-6 см, що забезпечує розпушення верхнього шару ґрунту, знищення проростків бур'янів та створення оптимального посівного ложа. Важливо, щоб глибина культивуації була рівномірною по всьому полю.

Вирівняна поверхня поля забезпечує рівномірну роботу сівалки, однакову глибину висіву насіння та полегшує проведення подальших технологічних операцій, зокрема догляду за посівами і збирання врожаю. На легких або надмірно розпушених ґрунтах після передпосівного обробітку або сівби можуть застосовувати коткування. Коткування покращує контакт насіння з ґрунтом, сприяє підтягуванню вологи до насіння та забезпечує дружні сходи [42].

У сучасних технологіях вирощування сої все частіше використовують комбіновані агрегати, які за один прохід виконують кілька операцій – розпушення, вирівнювання. Використання комбінованих агрегатів дозволяє скоротити витрати пального, зменшити ущільнення ґрунту та зберегти продуктивну вологу. Особливо ефективними комбіновані агрегати є в умовах мінімалізації обробітку ґрунту та ресурсозберігаючих технологій вирощування сої.

Важливим аспектом системи обробітку ґрунту під сою є боротьба з бур'янами, через повільний ріст рослин на початкових фазах розвитку соя слабо конкурує з бур'янами. Система обробітку повинна поєднувати механічні та, за потреби, хімічні заходи контролю забур'яненості. Ефективний обробіток ґрунту сприяє покращенню агрофізичних властивостей ґрунту, підвищенню його біологічної активності та створенню сприятливих умов для діяльності бульбочкових бактерій. Це забезпечує кращий ріст і розвиток рослин сої та формування високої й стабільної врожайності.

Система обробітку ґрунту під сою повинна бути адаптованою до конкретних ґрунтово-кліматичних умов господарства та поєднувати заходи, спрямовані на збереження вологи, покращення родючості ґрунту, контроль бур'янів і створення оптимальних умов для росту та розвитку культури [43].

Система удобрення сої є важливим елементом технології вирощування культури, оскільки забезпечує оптимальні умови для росту, розвитку рослин та формування високої врожайності. Система удобрення повинна бути спрямована на створення оптимального поживного режиму ґрунту. Соя здатна фіксувати атмосферний азот за допомогою бульбочкових бактерій та разом з тим культура потребує збалансованого забезпечення макро- і мікроелементами живлення.

Особливістю сої є висока потреба у поживних речовинах упродовж вегетаційного періоду. Для формування 1 т насіння та відповідної кількості побічної продукції рослини сої використовують значну кількість азоту, фосфору, калію, кальцію, магнію та мікроелементів. Для формування 1 т насіння сої разом із відповідною кількістю побічної продукції рослини виносять із ґрунту таку кількість основних макроелементів: азот (N) – 70-90 кг, фосфор ( $P_2O_5$ ) – 15-25 кг, калій ( $K_2O$ ) – 30-50 кг [44].

Найбільшу потребу соя має в азоті та калії. Частина потреби в азоті культура здатна забезпечувати за рахунок симбіотичної азотфіксації бульбочковими бактеріями, особливо за ефективної інокуляції насіння. На початкових етапах розвитку рослини використовують мінеральний азот із ґрунту, а після утворення бульбочок основна частина потреби забезпечується за рахунок біологічної

азотфіксації. Для активізації цього процесу важливе значення має інокуляція насіння препаратами бульбочкових бактерій. Надмірне внесення азотних добрив може пригнічувати утворення бульбочок і знижувати ефективність симбіотичної азотфіксації.

Фосфор є одним із найважливіших елементів живлення сої. Він сприяє розвитку кореневої системи, активізує енергетичні процеси, стимулює утворення бульбочок і прискорює досягання рослин. Особливо важливе фосфорне живлення на ранніх етапах розвитку культури.

Калій підвищує стійкість рослин до посухи, покращує водний режим, сприяє синтезу білків та підвищує якість насіння. Достатнє калійне живлення позитивно впливає на стійкість сої до несприятливих умов навколишнього середовища.

Органічні добрива відіграють важливу роль у технології вирощування сої, оскільки сприяють покращенню родючості ґрунту, активізації біологічних процесів та формуванню високої врожайності культури. Їх застосування забезпечує рослини поживними речовинами, покращує агрофізичні властивості ґрунту та підвищує ефективність використання мінеральних добрив.

Безпосередньо під сою свіжий гній вносять рідко, оскільки, це може спричинити надмірний розвиток вегетативної маси, подовження періоду досягання та посилення забур'яненості посівів. Найчастіше органічні добрива вносять під попередник сої у сівозміні. Післядія органічних добрив позитивно впливає на ріст і розвиток культури впродовж кількох років [45].

Соя є культурою, яка характеризується високою потребою не лише в макроелементах, а й у мікроелементах. Мікроелементи беруть активну участь у фізіолого-біохімічних процесах рослин, впливають на ріст, розвиток, фотосинтез, азотфіксацію та формування врожайності. При нестачі окремих мікроелементів продуктивність сої може істотно зменшуватися. Важливе значення для сої мають мікроелементи, зокрема, молібден, бор, марганець, цинк і кобальт.

Молибден має особливе значення для сої, оскільки бере участь у процесах біологічної фіксації азоту та синтезі білка. Він активізує діяльність бульбочкових бактерій і сприяє утворенню бульбочок на коренях. При нестачі молибдену погіршується азотне живлення рослин, сповільнюється ріст і знижується врожайність. Молибден локалізується в молодих органах рослини. В кінці вегетації більша частина його зосереджується в достиглому насінні. Молибден входить до складу ферменту нітрогенази, який сприяє біологічній фіксації азоту атмосфери.

Специфічна роль молибдену в процесі азотфіксації обумовлюється покращенням азотного живлення бобових культур, підвищує ефективність фосфорних та калійних добрив, при цьому поряд з ростом урожайності підвищується вміст білка [46, 47].

Бор необхідний для нормального цвітіння, запилення та формування бобів. Він покращує транспорт вуглеводів у рослині, підвищує стійкість до стресових умов та сприяє кращому зав'язуванню насіння. Дефіцит бору може спричинити опадання квіток і бобів.

Марганець бере участь у процесах фотосинтезу, дихання та азотного обміну. Особливо важливий він для активізації ферментних систем. Нестача марганцю часто проявляється у вигляді хлорозу листя.

Цинк впливає на синтез ростових речовин, розвиток кореневої системи та процеси білкового обміну. За його нестачі рослини пригнічуються, уповільнюється ріст і знижується продуктивність.

Кобальт сприяє активізації діяльності бульбочкових бактерій та покращує процеси азотфіксації. Він є важливим елементом для формування ефективного симбіозу між рослиною і мікроорганізмами. Мідь і залізо беруть участь у процесах фотосинтезу, дихання та окисно-відновних реакціях. Їх дефіцит негативно впливає на ріст рослин і формування врожаю.

Для забезпечення сої мікроелементами застосовують: передпосівну обробку насіння, інокуляцію з додаванням мікроелементів, позакореневі підживлення у критичні фази розвитку. Особливо ефективним є поєднання мікроелементів з

інокулянтами та біостимуляторами, що сприяє активізації фізіологічних процесів і підвищенню стійкості рослин до несприятливих умов середовища [48, 49].

Позакореневе підживлення сої забезпечує оперативне надходження елементів живлення через листову поверхню рослин. Такий спосіб удобрення дозволяє швидко усунути дефіцит поживних речовин, активізувати фізіологічні процеси та підвищити стійкість рослин до несприятливих умов середовища.

Для досягнення високої ефективності позакорневих підживлень необхідно дотримуватись таких вимог: проводити обробки у ранкові або вечірні години, уникати підживлення за високих температур і сильного сонячного випромінювання, використовувати робочі розчини оптимальної концентрації, забезпечувати рівномірне покриття листової поверхні, поєднувати підживлення із засобами захисту рослин лише за сумісності препаратів.

Позакореневі підживлення особливо ефективні в умовах посухи, низької доступності елементів живлення у ґрунті або пригнічення кореневої системи. Позакореневе підживлення сої проводять у найбільш критичні фази росту та розвитку культури, коли потреба рослин у поживних елементах значно зростає. Найефективнішими є такі строки проведення позакорневих підживлень:

Фаза 2-3 або 3-5 трійчастих листків – для стимулювання росту рослин, розвитку кореневої системи та активізації бульбочкових бактерій. У цей період особливо важливими є молібден, кобальт і цинк.

Фаза бутонізації – для покращення формування генеративних органів і підвищення стійкості рослин до стресових умов. Часто застосовують бор, марганець та комплексні мікродобрива.

Фаза цвітіння – для покращення запилення, зменшення опадання квіток і бобів, а також активізації процесів азотфіксації.

Фаза формування бобів – для забезпечення кращого наливу насіння, підвищення вмісту білка й олії та покращення врожайності [50].

Система удобрення сої повинна враховувати ґрунтово-кліматичні умови, рівень забезпеченості ґрунту поживними речовинами, запланований рівень урожайності та біологічні особливості сорту.

Високу ефективність забезпечує поєднання органічних і мінеральних добрив із біологічними препаратами. У сучасних умовах важливого значення набуває застосування ресурсозберігаючих та екологічно безпечних систем удобрення, які сприяють підвищенню продуктивності культури, збереженню родючості ґрунтів та зниженню негативного впливу на довкілля. Раціональна система удобрення сої є необхідною умовою формування високої та стабільної врожайності, підвищення якості насіння і ефективного використання природного потенціалу культури [51].

Умови Лівобережного Лісостепу України є сприятливими для вирощування сої завдяки достатньому тепловому забезпеченню та родючим ґрунтам. Проте нестійке зволоження й періодичні посухи вимагають правильного підбору сортів, адаптованих до ґрунтово-кліматичних умов регіону. Для ефективного вирощування необхідно використовувати високопродуктивні, скоростиглі та стійкі до хвороб і стресових факторів сорти.

Сорт сої, насамперед, має відповідати сучасним вимогам виробництва. За умов інтенсифікації аграрного сектору важливого значення набуває здатність сорту максимально реалізовувати власний генетичний потенціал продуктивності. У селекційній роботі значну увагу приділяють створенню адаптивних сортів, які характеризуються високою врожайністю та стійкістю до несприятливих абіотичних і біотичних чинників [52].

Потенційні можливості сучасних сортів сої у виробничих умовах використовуються не повною мірою. Рівень реалізації генетичного потенціалу продуктивності культури нині становить близько 60 %. Для повного розкриття продуктивних властивостей сортів необхідне дотримання науково-обґрунтованих елементів технології вирощування сої.

Запровадження у виробництво високопродуктивних сортів повинно супроводжуватися комплексним дотриманням технологічних заходів. Важливе

значення мають правильне розміщення культури в сівозміні, оптимізація системи живлення рослин, ефективний контроль бур'янів, шкідників і хвороб. Лише за гармонійного поєднання цих чинників можливо забезпечити максимальну реалізацію генетичного потенціалу сортів сої [53, 54].

Під час проведення державної кваліфікаційної експертизи сортів сої на придатність до поширення в Україні обов'язково здійснюють оцінювання їхньої стійкості до основних хвороб.

Агроекологічну стійкість сортів визначають за рівнем ураження найбільш поширеними захворюваннями, зокрема пероноспорозом, аскохітозом, бактеріозом, септоріозом і фузаріозом.

Визначають стійкість сортів сої до хвороб, посухи, вилягання рослин і обсіпання насіння за дев'ятибальною шкалою (1-9 балів), згідно якої 9 балів – найвища стійкість, а 1 бал – найнижча.

Залежно від тривалості вегетаційного періоду сорти сої, що є в Державному реєстрі сортів рослин поділяють на групи стиглості: скоростиглі, ранньостиглі, середньоранні та середньостиглі. Такий поділ має важливе значення для правильного підбору сортів відповідно до ґрунтово-кліматичних умов регіону вирощування.

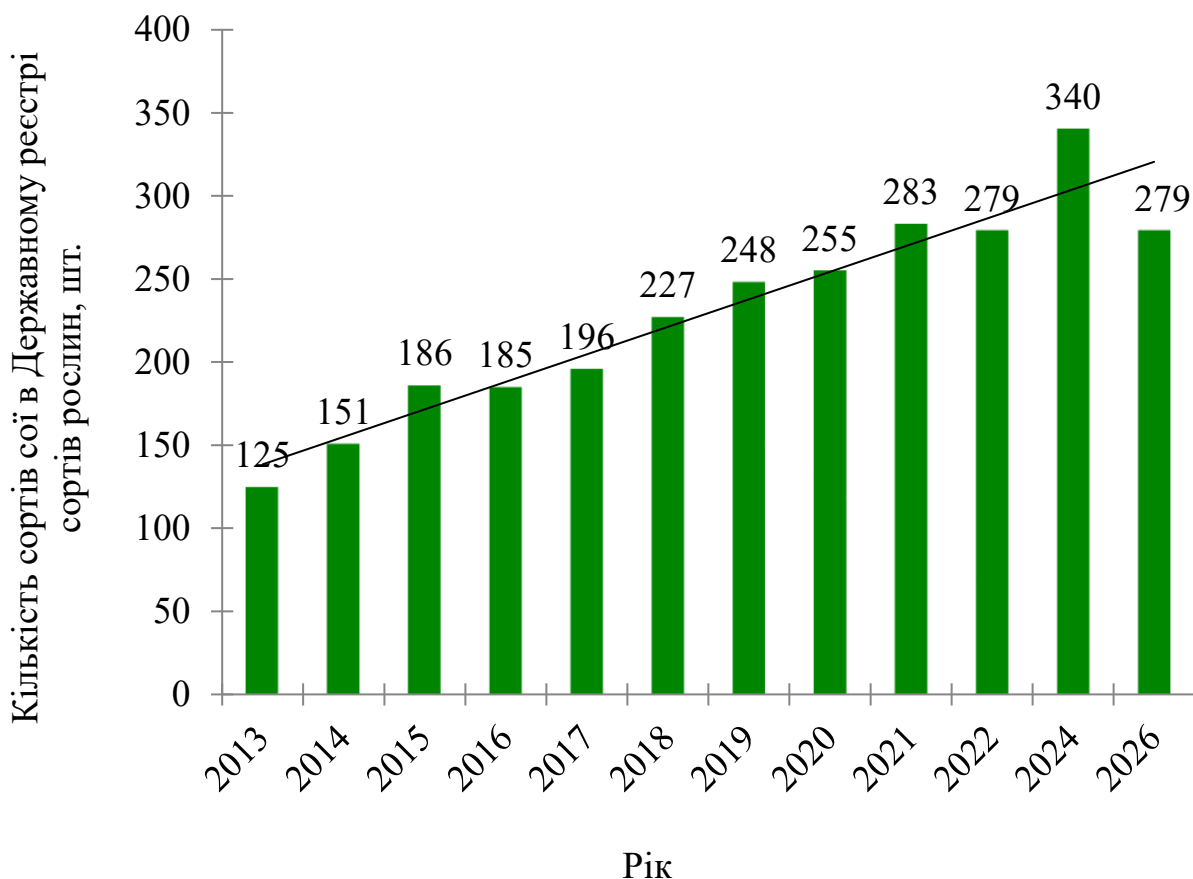
До основних показників технологічності сортів сої відносять висоту кріплення нижніх бобів, висоту рослин, стійкість до вилягання та осипання. Товщина стебла сої є важливою морфологічною ознакою, яка значною мірою впливає на стійкість рослин до вилягання [55, 56].

Станом на 2024 рік у Державному реєстрі сортів рослин, придатних до поширення в Україні, було зареєстровано 340 сортів сої як української, так і зарубіжної селекції.

В 2026 році в Державному реєстрі сортів рослин, придатних до поширення в Україні – 279 сортів сої.

Державний реєстр сортів рослин, придатних до поширення в Україні нараховував 279 сортів сої на 2022 рік. В 2013 році їх кількість становила 125. З

2013 по 2022 рік кількість сортів сої в Державному реєстрі зростає більше, ніж у 2 рази (рис. 2).



**Рисунок 2.** Динаміка кількості сортів сої в Державному реєстрі сортів рослин, придатних до поширення в Україні, 2013-2026 рр. [39]

Джерело рисунка: [57].

В Україні селекцією сої займаються науково-дослідні установи, селекційні центри, які створюють високопродуктивні, адаптивні та стійкі до несприятливих умов сорти. Вітчизняні сорти сої характеризуються доброю пристосованістю до ґрунтово-кліматичних умов України, високим потенціалом урожайності та підвищеним вмістом білка й олії. Українські установи-оригінатори відіграють важливу роль у розвитку селекції сої та забезпеченні аграрного виробництва конкурентоспроможними сортами, адаптованими до умов вирощування в Україні [58].

Інститут кормів та сільського господарства Поділля НААН є визнаним лідером у селекції сої в Україні. За роки роботи науковцями інституту було створено цілу низку сортів, які адаптовані до різних кліматичних зон і вирізняються високою продуктивністю та якістю зерна.

Сорт сої Агат внесений до Реєстру сортів у 2000 році та рекомендований для вирощування в умовах Лісостепу і Степу. Тривалість вегетаційного періоду становить 110-120 діб. Потенційна врожайність сорту сягає 2,68–2,97 т/га. Належить до сортів зернового напрямку використання.

Сорт Діадема Поділля занесений до Реєстру у 2015 році для вирощування в зонах Степу, Лісостепу та Полісся. Вегетаційний період становить 105-115 діб. Потенціал урожайності 2,65-2,85 т/га. Належить до сортів зернового напрямку використання.

Сорт Самородок зареєстрований у 2018 році для Лісостепу та Степу. Це середньоранньостиглий сорт із тривалістю періоду вегетації 97-108 діб. Його потенційна врожайність досягає 5,0 т/га. Призначений для зернового використання.

Сорт Азимут включений до Реєстру сортів у 2019 році та рекомендований для вирощування в Степу, Лісостепу і Поліссі. Вегетаційний період – 107-125 діб. Потенційний рівень урожайності становить 3,3-3,6 т/га. Призначений для зернового використання.

Сорт Паллада внесена до Реєстру у 2020 році для зон Лісостепу та Степу. Сорт належить до ранньостиглих, а тривалість його вегетаційного періоду становить 103-115 діб. Потенціал урожайності – 2,6-3,0 т/га. Напрямок використання – зерновий.

Сорт Титан зареєстрований у 2020 році для вирощування в Лісостепу та Степу. Це ранньостиглий сорт із вегетаційним періодом 110-115 діб. Потенційна врожайність становить 3,2-3,5 т/га. Напрямок використання – зерновий.

Сорт Тріада внесений до Реєстру сортів у 2015 році для зон Степу, Лісостепу та Полісся. Вегетаційний період становить 110-120 діб. Потенційна врожайність сорту 2,54-2,76 т/га. Напрямок використання – зерновий.

Сорт Чураївна зареєстрований у 2020 році для вирощування в Степу, Лісостепу та Поліссі. Належить до середньоранньостиглих сортів. Вегетаційний період становить 115-120 діб. Потенціал урожайності досягає 2,48 т/га. Тип використання – зерновий [59].

Інститут рослинництва імені В. Я. Юр'єва НААН України веде селекційну роботу зі створення високопродуктивних та адаптивних сортів сої для різних зон України.

Скоростиглі та ранньостиглі сорти цінуються за можливість раннього збору врожаю та використання їх як гарних попередників під озимі культури.

Сорт Кобза – один із найпопулярніших ранньостиглих сортів (тривалість вегетаційного періоду становить 95-98 днів). Має потенціал урожайності 3,3–3,5 т/га, вміст білка 37-39% та високу стійкість до осипання. Сорт Спритна – ранньостиглий сорт, адаптований до різних типів ґрунтів, вирізняється стабільною врожайністю, навіть за несприятливих умов. Сорт Мальвіна характеризується високою пластичністю та стійкістю до основних збудників хвороб. Сорт сої Байка поєднує ранньостиглість із високим кріпленням нижніх бобів, що мінімізує втрати при механізованому збиранні.

Середньоранні та середньостиглі сорти мають вищий потенціал урожайності завдяки довшому вегетаційному періоду.

Сорт Різдяна – високобілковий сорт зернового напрямку з підвищеною посухостійкістю. Один із лідерів за якісними показниками зерна. Сорт характеризується світло-сірим опушенням і фіолетовими квітками. Насіння жовтого кольору, овально-кулястої форми, зі світло-коричневим рубчиком та вічком. Маса 1000 насінин становить 140-180 г. Належить до ранньостиглих сортів, тривалість вегетаційного періоду складає 98-100 діб. Висота рослин варіює в межах 70-90 см, висота кріплення нижніх бобів 15 см. Сорт відзначається високою стійкістю до вилягання та осипання насіння, має підвищену посухостійкість і стійкість до основних хвороб. Вміст білка в насінні становить у середньому 38,7-43,6%, олії - 21,0 %.

Сорт сої Писанка. Рослини мають світло-сіре опушення та фіолетові квітки. Насіння жовтого кольору зі світло-коричневим рубчиком. Маса 1000 насінин становить 130-180 г. Сорт належить до ранньостиглих, тривалість вегетаційного періоду складає 94-96 діб. Висота рослин варіює в межах 70-90 см, а висота кріплення нижніх бобів становить 16 см. Сорт характеризується високою стійкістю до вилягання рослин і осипання насіння. Також сорт відзначається доброю посухостійкістю та підвищеною стійкістю до хвороб. Середній вміст білка в насінні становить 38,3%, а олії – 21,5%.

Сорт сої Перлина – сорт інтенсивного типу, що вимагає високого агрофону, але віддячує рекордною врожайністю. Сорт сої Естафета – вирізняється стійкістю до вилягання та високим вмістом олії [60].

Інститут олійних культур НААН України проводить селекційну роботу зі створення високобілкових сортів сої. Сорти сої запорізької селекції Етюд, Ранок, Офелія, Спринт, Маша, Шарм, Галі, Дені, Рапсодія [61].

Сорт сої Спринт має тривалість вегетаційного періоду 84 доби. Рослини досягають висоти до 83 см, а висота кріплення нижніх бобів – 10-13 см від поверхні ґрунту. Урожайність у зоні Степу становить у середньому 2,0 т/га, у Лісостепу може досягати 2,5 т/га. Маса 1000 насінин знаходиться в межах 100-130 г. Насіння характеризується вмістом олії на рівні 20-23%, а білка – 36-38%. Сорт відзначається стійкістю до вилягання, а боби не розтріскуються навіть за перестоювання рослин. Також він має підвищену стійкість до бактеріозу та вірусної мозаїки.

Завдяки короткому періоду вегетації сорт придатний для повторних посівів. У разі вирощування в основних посівах забезпечує раннє звільнення площ, що дає можливість своєчасно підготувати ґрунт під озимі зернові культури. Сорт належить до зернового типу, характеризується високою посухостійкістю та є добрим попередником для більшості сільськогосподарських культур.

Сорт сої Галі має тривалість вегетаційного періоду – 84-90 діб, висоту рослин – 70-80 см, висоту прикріплення нижніх бобів – 12-15 см, масу 1000 насінин – 120-140 г, високий вміст білка в олії – 36-38%, олійність – 23-25%,

урожайність насіння – 1,5-2,0 т/га. Сорт інтенсивного типу відрізняється підвищеною продуктивністю, технологічний, посухостійкий, добре реагує на зрошення, стійкий проти вилягання рослин та розтріскування бобів, пристосований до умов збирання, добрий попередником для всіх сільськогосподарських культур. Рекомендовано для вирощування в усіх ґрунтово-кліматичних зонах України.

Сорт сої Дені має тривалість вегетаційного періоду - 89-90 діб. Висота рослин – 70-90 см. Висота прикріплення нижніх бобів – 10-12 см. Маса 1000 насінин - 113-125 г. Вміст білка – 36-38%, олії – 22-23%. Урожайність – 1,4-2,0 т/га. Сорт технологічний, посухостійкий, добре реагує на зрошення. Стійкий проти вилягання рослин та розтріскування бобів. В польових умовах стійкий проти грибкових і бактеріальних хвороб. Є добрим попередником для багатьох сільськогосподарських культур. Рекомендовано для вирощування в усіх ґрунтово-кліматичних зонах України.

Сорт сої Шарм. Тривалість вегетаційного періоду сорту становить 115-117 діб. Висота рослин варіює в межах 95-110 см, а висота кріплення нижніх бобів 10-13 см від поверхні ґрунту. Маса 1000 насінин складає 127-145 г. Насіння характеризується високим вмістом олії – 24-25%, що забезпечує добрі смакові властивості та робить сорт придатним для використання в олійно-жировій промисловості. Вміст білка становить 35-38 %. Урожайність сорту в умовах Лісостепу досягає 2,5 т/га, а в зоні Полісся до 2,0 т/га. Сорт відзначається посухостійкістю, стійкістю до вилягання рослин і розтріскування бобів. Сорт добре реагує на зрошення, технологічний. Сорт рекомендований для вирощування в усіх ґрунтово-кліматичних зонах України.

Сорт сої Рапсодія. Тривалість вегетаційного періоду становить 123 доби. Висота рослин – 90-110 см. Опущення стебла біле. Листя помірного зеленого кольору, середнього розміру, овальної форми і при досяганні опадає. Квітка фіолетова. Висота прикріплення нижніх бобів – 12-15 см. Маса 1000 насінин варіює в межах 85-115 г. Вміст білка становить 36-37%, а олії – 23-25%.

Урожайність знаходиться на рівні 1,4-2,0 т/га. Стійкий проти вилягання рослин та розтріскування бобів.

Інститут сільського господарства Степу НААН України спеціалізується на створенні сортів для умов недостатнього зволоження. Сорти сої Камея, Златопільська.

Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннізнавства та сортовивчення НААН України провадить селекційну роботу зі створення сортів сої з високою продуктивністю та стійкістю до стресових факторів. Сорти одеської селекції Альтаїр, Аркадія одеська, Хаджибей, Чорнобура, Успіх [62, 63].

Вітчизняні наукові установи постійно працюють над створенням сортів сої з високим потенціалом урожайності, адаптованих до змін клімату, стійких до посухи, вилягання та хвороб, придатних до механізованого збирання, з високим вмістом білка та олії.

Селекція сільськогосподарських культур на стійкість до несприятливих умов довкілля є одним із пріоритетних напрямів сучасної селекційної науки. Це пов'язано з тим, що можливості регулювання тривалих і особливо короткочасних стресових факторів середовища є обмеженими, тоді як їх негативний вплив на рівень урожайності може бути дуже значним.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах інтенсивних технологій вирощування культур, оскільки застосування високих доз азотних добрив, загущення посівів та зрошення активізують ростові процеси рослин, але водночас знижують їх стійкість до короткочасних несприятливих чинників навколишнього середовища.

Для України ця проблема має важливе значення через те, що значна частина території країни характеризується недостатнім зволоженням і посушливими кліматичними умовами. Крім того, понад половина орних земель представлена кислими, засоленими, перезволоженими або еродованими ґрунтами. За таких умов сучасний сорт повинен поєднувати високу продуктивність із здатністю адаптуватися до конкретних екологічних факторів. Саме створення пластичних і адаптивних сортів є одним із головних завдань сучасної селекції [64].

Адаптивність високопродуктивних сортів сої полягає не лише у стійкості до несприятливих факторів довкілля, а й у здатності максимально ефективно використовувати елементи інтенсивної технології, зокрема зрошення та мінеральне живлення. Важливість адаптивної селекції також пов'язана з необхідністю виробництва екологічно безпечної продукції рослинництва та охороною навколишнього середовища [65].

Створення сортів, стійких до шкідників і хвороб, дозволяє зменшити потребу у застосуванні хімічних засобів захисту рослин. Адаптивна селекція охоплює комплекс методів селекційної роботи, спрямованих на виведення сортів, здатних формувати високий рівень продуктивності в конкретних природно-кліматичних умовах регіону за існуючих технологій вирощування. Екологічно орієнтований підхід у селекції передбачає генетико-фізіологічне обґрунтування моделі пластичного сорту з урахуванням основних лімітуючих факторів середовища тієї зони, для якої створюється сорт [66].

Ефективність селекції на стійкість сортів сої до стресових факторів визначається не лише досвідом селекціонера, а й наявністю цінного вихідного матеріалу та дієвих методів оцінювання адаптивних властивостей рослин. Важливими складовими методики селекції на стійкість є систематичне дослідження селекційного матеріалу, оцінювання морфологічних і фізіологічних характеристик, а також виявлення та добір високопродуктивних джерел і донорів, адаптованих до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Бажано, щоб такі вихідні форми поєднували стійкість із цінними господарськими ознаками.

На сучасному етапі розвитку селекції створено високоадаптивні сорти, які характеризуються значним рівнем генетичної стійкості до впливу біотичних та абіотичних чинників. Такі сорти здатні ефективно реалізовувати потенціал продуктивності та одночасно формувати насіння високої якості [67, 68].

Для сівби використовують високоякісне насіння сучасних сортів із високими показниками схожості, чистоти та енергії проростання. Насіння повинно бути вирівняним за розміром, неушкодженим і відповідати посівним стандартам. Для оцінювання посівних властивостей насіння сої проводять

лабораторний аналіз у спеціалізованих сертифікованих установах. Під час дослідження визначають показники сортової чистоти, яка повинна становити не менше 98%, лабораторної схожості – не нижче 90%, енергії проростання, а також масу 1000 насінин [69].

Маса 1000 насінин є важливим показником якості насіння сої, який характеризує крупність насіння та певною мірою впливає на польову схожість, енергію проростання і продуктивність рослин. Цей показник залежить від сорту, ґрунтово-кліматичних умов, рівня агротехніки та умов формування врожаю. У різних сортів сої маса 1000 насінин може значно варіювати. Для умов України найчастіше маса 1000 насінин сої перебуває в межах 140-200 г.

На величину маси 1000 насінин впливають: сортові особливості, забезпечення рослин вологою, рівень мінерального живлення, густина стояння рослин, температурний режим у період наливу насіння. За недостатнього вологозабезпечення або високих температур під час наливу бобів маса 1000 насінин зазвичай зменшується. Маса 1000 насінин є важливим господарсько-біологічним показником сої, що характеризує якість насіння та впливає на формування продуктивності культури [70, 71].

Інокуляція насіння сої є одним із найважливіших елементів сучасної технології вирощування культури. Вона полягає в обробці насіння спеціальними препаратами, що містять бульбочкові бактерії (*Bradyrhizobium japonicum*), які здатні вступати у симбіоз із рослинами сої та забезпечувати фіксацію атмосферного азоту.

Соя характеризується високою потребою в азоті, і значну частину цієї потреби рослини можуть забезпечувати за рахунок біологічної азотфіксації. За ефективного функціонування бульбочкових бактерій рослини здатні засвоювати до 60-70% необхідного азоту з атмосфери, що суттєво зменшує потребу у внесенні азотних добрив. Інокуляція насіння сприяє: активному утворенню бульбочок на коренях, покращенню азотного живлення рослин, посиленню росту та розвитку сої, підвищенню врожайності, збільшенню вмісту білка в насінні, покращенню родючості ґрунту [72].

Для інокуляції використовують спеціальні бактеріальні препарати: Ризогумін, Ризоактив, Ризобофіт, Ризолайн, Ризофікс, Нітрагін, Нітрофікс, Оптімайз, HiStick.

Інокулянти можуть бути: рідкими, торф'яними, порошкоподібними, гелевими. Рідкі інокулянти характеризуються рівномірним нанесенням на насіння, високою концентрацією бактерій та зручністю у використанні. Проте вони мають обмежений термін зберігання та чутливі до температурних умов. Торф'яні інокулянти – високоефективні біологічні препарати на основі стерилізованого торфу, що слугує природним живильним середовищем і надійним захистом для корисних бактерій. Порошкоподібні інокулянти є простими у використанні та мають добру сипучість, однак потребують якісного прилипача для рівномірного нанесення на насіння. Гелеві інокулянти забезпечують надійний контакт бактерій із насінням, створюють захисну плівку навколо насіння.

Обробку насіння проводять безпосередньо перед сівбою. Важливо забезпечити рівномірне нанесення препарату на поверхню насіння та уникати пересихання інокульованого матеріалу.

Під час проведення інокуляції необхідно: уникати дії прямих сонячних променів, висівати насіння у вологий ґрунт, дотримуватись рекомендованих норм препарату, враховувати сумісність інокулянтів із протруйниками [73, 74].

Деякі фунгіцидні препарати можуть негативно впливати на життєздатність бульбочкових бактерій, тому часто застосовують спеціальні захисні компоненти або проводять інокуляцію після протруювання. Для активної роботи бульбочкових бактерій необхідні: достатня вологість ґрунту, оптимальна температура, нейтральна або слабнокисла реакція ґрунтового розчину, достатнє забезпечення фосфором, калієм, молібденом і кобальтом.

За сприятливих умов на коренях сої утворюються бульбочки рожевого кольору, що свідчить про ефективне проходження процесу азотфіксації. Інокуляція насіння сої є високоефективним і економічно вигідним

агротехнічним заходом, який забезпечує покращення азотного живлення рослин, підвищення врожайності та збереження родючості ґрунту.

Протруювання насіння сої є важливим елементом передпосівної підготовки, що забезпечує захист насіння та сходів від комплексу хвороб і ґрунтових шкідників на початкових етапах росту та розвитку рослин. Якісне протруювання сприяє підвищенню польової схожості, формуванню дружних сходів і створює передумови для отримання високої врожайності культури [75-77].

Насіння сої може уражуватися збудниками грибних і бактеріальних хвороб, які передаються через насіннєвий матеріал або зберігаються у ґрунті. Найпоширенішими хворобами є фузаріоз, кореневі гнилі, аскохітоз, пероноспороз, бактеріози. Протруювання дозволяє значно знизити ураження рослин у початковій фазі розвитку та забезпечує кращу стійкість сходів до несприятливих умов середовища. Для обробки насіння використовують фунгіцидні або комбіновані фунгіцидно-інсектицидні препарати на основі різних діючих речовин.

Протруювання проводять завчасно або безпосередньо перед сівбою за допомогою спеціальних протруювачів. Важливо забезпечити рівномірне нанесення препарату, дотримання рекомендованих норм витрати, якісне покриття поверхні насіння, мінімальне травмування насіння. Для обробки використовують чисте та відкаліброване насіння з високими посівними якостями.

Правильно проведене протруювання підвищує стійкість рослин до хвороб, забезпечує рівномірні сходи, покращує розвиток кореневої системи, сприяє формуванню високопродуктивних посівів. Протруювання насіння сої є важливим агротехнічним заходом, який забезпечує ефективний захист рослин на початкових етапах розвитку та створює сприятливі умови для формування стабільного врожаю культури [78].

Оптимальні строки сівби сої істотно впливають на польову схожість, ріст і розвиток рослин, формування бобів та рівень урожайності. Правильний вибір строків сівби забезпечує ефективне використання ґрунтової вологи, дружні

сходи, активний розвиток кореневої системи, реалізацію генетичного потенціалу сорту. Соя належить до культур пізніх строків сівби. Основною ознакою настання оптимального періоду для висіву є стабільне прогрівання ґрунту на глибині 10 см до 10-14 °С, а також встановлення середньодобової температури повітря на рівні 10-12 °С.

Насіння сої може проростати вже за температури 6-7 °С, проте за таких умов процес проростання відбувається повільно. Висівання у недостатньо прогрітій ґрунт часто спричиняє затримку появи сходів і підвищує ризик ураження рослин хворобами. Водночас температура ґрунту 16-18 °С свідчить про запізнення із сівбою, що може призвести до пересихання верхнього шару ґрунту та погіршення формування рівномірних і дружних сходів сої [79].

Залежно від ґрунтово-кліматичної зони оптимальні строки сівби можуть відрізнятися: у Лісостепу – друга половина квітня – початок травня, у Степу – середина – кінець квітня, на Поліссі – кінець квітня – перша декада травня.

Для умов Лівобережного Лісостепу оптимальним вважається висівання сої наприкінці квітня або на початку травня. Ранні строки сівби забезпечують: формування потужної кореневої системи, підвищення стійкості рослин до посухи; рівномірне досягання, підвищення врожайності. Однак надто рання сівба у недостатньо прогрітій ґрунт може призводити до затримки появи сходів, ураження насіння хворобами, зрідження посівів, зниження польової схожості. Запізнення із сівбою часто супроводжується дефіцитом ґрунтової вологи, погіршенням польової схожості, пригніченням росту рослин, зниженням урожайності.

Оптимальні строки сівби сприяють формуванню високопродуктивних агрофітоценозів та забезпечують стабільну врожайність культури. Вибір оптимальних строків сівби сої повинен базуватися на температурному режимі ґрунту, запасах продуктивної вологи, біологічних особливостях сорту та погодних умовах конкретного регіону вирощування [80].

Спосіб сівби сої є важливим елементом технології вирощування культури, оскільки він впливає на рівномірність розміщення рослин, рівень освітлення

посівів, використання вологи та поживних речовин, а також на формування врожайності. Вибір способу сівби залежить від сортових особливостей, ґрунтово-кліматичних умов, забезпечення вологою.

Рядковий спосіб сівби сої забезпечує рівномірне розміщення рослин, ефективне використання площі живлення, пригнічення бур'янів. Рядковий спосіб найчастіше застосовують за достатнього зволоження та на чистих від бур'янів полях. Широкорядну сівбу проводять із міжряддям 45-70 см. Перевагою широкорядного способу є можливість міжрядного обробітку, краща аерація посівів, зменшення ураження хворобами, ефективніший контроль бур'янів. Такий спосіб часто використовують у посушливих умовах за високої забур'яненості та при вирощуванні сої за мінімального застосування гербіцидів. Іноді застосовують стрічкову сівбу за схемою 50×15 чи 60×15 см [81, 82].

Глибина загортання насіння залежить від вологості та механічного складу ґрунту: 3-4 см на важких і вологих ґрунтах; 4-5 см на легких ґрунтах або за недостатнього зволоження. Надто глибоке загортання насіння може затримувати появу сходів і знижувати польову схожість.

Надмірне загущення посівів посилює конкуренцію між рослинами за світло, вологу та поживні речовини, що негативно впливає на формування бобів і насіння. Водночас недостатня густина призводить до неповного використання площі живлення та зниження продуктивності агроценозу.

Для різних зон України рекомендована густина рослин перед збиранням становить: у Степу – 400-500 тис. шт./га; у Лісостепу – 500-700 тис. шт./га; на Поліссі – 600-800 тис. шт./га. Норма висіву сої не є сталою цифрою, вона залежить від групи стиглості сорту, способу сівби та запасів вологи у ґрунті. Головна мета – досягти оптимальної густоти стояння рослин на момент збирання. Ранньостиглі сорти зазвичай висівають густіше, ніж середньостиглі та пізньостиглі. Норму висіву визначають з урахуванням маси 1000 насінин, лабораторної та польової схожості, бажаної густоти стояння рослин. Для отримання оптимальної густоти рослин норму висіву збільшують на 10-15 % порівняно з розрахунковою кількістю рослин перед збиранням [83-87].

Догляд за посівами сої є важливим елементом технології вирощування культури, спрямованим на створення оптимальних умов для росту і розвитку рослин, ефективного використання вологи та поживних речовин, а також захисту посівів від бур'янів, шкідників і хвороб. Своєчасне та якісне проведення заходів догляду забезпечує формування високої та стабільної врожайності сої.

Після сівби за потреби проводять коткування, досходове боронування. Коткування сприяє ущільненню ґрунту, покращує контакт насіння з ґрунтом і забезпечує дружні сходи, особливо за недостатнього зволоження. Досходове боронування проводять через 3-5 днів після сівби для руйнування ґрунтової кірки та знищення сходів бур'янів, для цього використовують легкі або середні борони. Післясходове боронування застосовують у фазі першого трійчастого листка за умови доброго укорінення рослин. Воно сприяє знищенню бур'янів, покращенню аерації ґрунту, збереженню вологи. Боронування проводять обережно, щоб не пошкодити рослини сої.

За широкорядного способу сівби здійснюють міжрядні культивації: першу після появи сходів, наступні – залежно від забур'яненості та ущільнення ґрунту. Міжрядний обробіток забезпечує знищення бур'янів, розпушення ґрунту, покращення водно-повітряного режиму.

Соя на початкових етапах росту характеризується повільним розвитком і слабкою конкурентною здатністю, у порівнянні з бур'янами, тому контроль забур'яненості має велике значення. Для захисту посівів застосовують агротехнічні, механічні, хімічні методи .

У сучасному землеробстві гербіциди є невід'ємною складовою інтенсивних технологій вирощування сої. Використовують ґрунтові та післясходові гербіциди. Ґрунтові гербіциди застосовують до сівби, після сівби або до появи сходів культури. Вони пригнічують проростання бур'янів у верхньому шарі ґрунту. Ґрунтові гербіциди найбільш ефективно застосовувати при достатній вологості ґрунту. Післясходові гербіциди застосовують у період вегетації сої для контролю бур'янів, які вже зійшли [88].

Гербициди суцільної дії на основі гліфосату застосовують окремо або в бакових сумішах з іншими препаратами для розширення спектра контролю бур'янів. Їх використовують восени або навесні після відновлення вегетації бур'янової рослинності. Найефективнішим є весняне внесення у період активного росту бур'янів, коли відбувається інтенсивне переміщення поживних речовин між надземною частиною та кореневою системою. Найчастіше гліфосатвмісні препарати застосовують на недостатньо окультурених полях із високим рівнем забур'яненості багаторічними коренепаростковими, кореневищними злаковими та дводольними бур'янами.

У технологіях Mini-till і No-till гліфосат має важливе значення, оскільки дозволяє контролювати бур'яни без механічного обробітку ґрунту. Тривале й надмірне використання гліфосату може призводити до формування стійких видів бур'янів, накопичення резистентності, екологічних ризиків, порушення біологічної активності ґрунту.

Ефективність гербицидного захисту залежить від правильного підбору препарату, видового складу бур'янів, фази розвитку бур'янів, погодних умов, вологості ґрунту, дотримання рекомендованих норм внесення. Найкращі результати забезпечує інтегрована система захисту, яка поєднує агротехнічні заходи, сівозміну, міжрядний обробіток, хімічний контроль бур'янів. Неправильне використання гербицидів може спричинити пригнічення росту культури, накопичення залишків препарату у ґрунті, формування резистентності бур'янів. Важливо дотримуватися регламентів застосування препаратів та чергувати гербициди з різними механізмами дії.

Найбільш небезпечними бур'янами у посівах сої є лобода, щириця, паслін, а також багаторічні види – берізка польова, осот і амброзія. Проведення гербицидного обробітку до фази формування п'ятого трійчастого листка практично не має негативного впливу на майбутню врожайність культури.

Фаза утворення 1-3 трійчастих листків є одним із критичних періодів росту і розвитку сої, тому саме в цей час особливо важливо забезпечити ефективний контроль бур'янів і мінімізувати їх конкуренцію з культурними рослинами.

Для захисту посівів сої застосовують комплекс ґрунтових і післясходових гербіцидів. До ґрунтових препаратів належать Харнес, Трофі, Дуал Голд та інші. Післясходові гербіциди використовують для контролю: дводольних бур'янів – Базагран, Хармоні; злакових бур'янів – Селект, Міура; змішаного типу забур'яненості – Пульсар, Фабіан.

Для обмеження розвитку бур'янів у посівах сої застосовують ґрунтові гербіциди, які вносять до сівби, після сівби або до появи сходів культури. Їх використання дозволяє ефективно контролювати бур'яни на початкових етапах росту й розвитку сої, коли культура є найбільш чутливою до конкуренції. Серед препаратів, що демонструють високу ефективність проти однорічних дводольних, а також злакових бур'янів, використовують Дуал Голд 96% к.е. – 1,0-1,4 л/га; Фронт'єр 90% к.е. – 1,1-1,7 л/га; Півот 10% в.р.к. – 0,5-0,8 л/га; Харнес 90 % к.е. – 1,5-2,5 л/га [89-91].

Норми внесення препаратів та особливості їх застосування визначаються залежно від ґрунтово-кліматичних умов регіону, рівня забур'яненості поля та рекомендацій щодо використання пестицидів і агрохімікатів, дозволених в Україні [92].

У первинному ареалі походження сої культурної найбільшу шкодочинність серед хвороб мають фузаріоз, септоріоз, пероноспороз, церкоспороз, аскохітоз, бактеріози – кутуватий і пустульний, а також вірусна мозаїка. Для європейського регіону найбільш характерними та небезпечними є вугільна, сіра і біла гнилі, фузаріоз, пероноспороз, септоріоз, альтернаріоз, фітофтороз, рак стебла, бактеріальний опік, сім'ядольний бактеріоз, бактеріальне в'янення, пустульна плямистість і різні вірусні хвороби сої [93].

Сорти сої з підвищеною стійкістю до хвороб мають важливе значення для сучасного виробництва та характеризуються низкою переваг у технології вирощування. Використання таких сортів дозволяє зменшити ураження рослин основними захворюваннями сої, зокрема фузаріозом, аскохітозом, пероноспорозом, септоріозом і бактеріозом, що позитивно впливає на появу дружних сходів, ріст і розвиток рослин протягом усього періоду вегетації.

Застосування стійких сортів дає можливість знизити потребу у фунгіцидних обробках, завдяки чому скорочуються витрати на захист рослин та підвищується екологічна безпечність технології вирощування. Крім того, такі сорти забезпечують більш стабільний рівень урожайності та кращі показники якості насіння за різних ґрунтово-кліматичних умов, особливо у роки з надмірним зволоженням, коли поширення хвороб значно посилюється.

Впровадження у виробництво сортів сої, стійких до комплексу хвороб, сприяє підвищенню ефективності вирощування культури та покращенню економічних показників виробництва [94, 95].

Високою стійкістю до аскохітозу на рівні 9 балів у поєднанні з високими показниками врожайності характеризуються сорти Ахілеа, Покахонтас, Дакота, ЕС Компетитор, Алісія, ОАЦ Аттіка, ОАЦ Кенді, Альвеста, Сассекс, РЖТ Сакуза, ЕС Візітор, Абака, Атрактор, Кобуко, Стіне 11Н20, Стайн 07Ж22, АФК Темпо, ЕС Колектор, Смарагд, Комбінатор і Фріне.

У Державному реєстрі сортів рослин є сорти сої, що характеризуються стійкістю до пероноспорозу на рівні 9 балів. Поєднання високої стійкості до цієї хвороби та високої врожайності притаманне сортам Ахілеа, Покахонтас, Алісія, АФК Спрін, Кобуко, Стайн 07Ж22, АФК Темпо, Комбінатор, Кінгстон і Фріне.

Стійкість до бактеріозу на рівні 9 балів з високою врожайністю поєднують сорти Ахілеа, ЕС Компетитор, Алісія, Сассекс, РЖТ Сакуза, Стіне 11Н20, Стайн 07Ж22 і Смарагд.

Високий рівень урожайності у поєднанні зі стійкістю до септоріозу у сортів сої Крістіан, ЕС Компетитор, Алісія, Кобуко, Стіне 11Н20, Стайн 07Ж22, АФК Темпо, ЕС Колектор і Смарагд.

В Державному реєстрі сортів рослин наявні сорти сої, які характеризуються комплексною стійкістю до основних хвороб – фузаріозу, аскохітозу, пероноспорозу, бактеріозу та септоріозу, а також формують високий рівень урожайності – понад 3,5 т/га. До таких сортів належать: Фріне (3,50 т/га), Кінгстон (3,51 т/га), Ліска (3,52 т/га), Комбінатор (3,52 т/га), Смарагд (3,58 т/га), ЕС Колектор (3,63 т/га), АФК Темпо (3,64 т/га), Стайн 07Ж22 (3,65 т/га), Стіне

11Н20 (3,66 т/га), Атрактор (3,68 т/га), Кобуко (3,68 т/га), Абака (3,69 т/га), АФК Спрін (3,69 т/га), РЖТ Сателія (3,73 т/га), ЕС Візитор (3,75 т/га), РЖТ Сакуза (3,77 т/га), Сассекс (3,79 т/га), РЖТ Сальса (3,82 т/га), Альвеста (3,84 т/га), ОАЦ Кенді (3,87 т/га), ОАЦ Аттіка (3,91 т/га), Алісія (3,93 т/га), ЕС Компетітор (3,96 т/га), Дакота (3,97 т/га), Крістіан (4,02 т/га), Сахара (4,05 т/га), Покахонтас (4,08 т/га) та Ахілеа (4,38 т/га).

Окрім високої врожайності та стійкості до комплексу хвороб, зазначені сорти відзначаються підвищеними показниками якості насіння. Вміст білка у них становить від 37,2 до 44,6%. Найвищий рівень білка у сортів Ліска (44,6%), Комбінатор (43,2%), ОАЦ Аттіка (42,1 %), РЖТ Сакуза (42,0%), Абака (41,8 %), РЖТ Сальса (41,6 %), ЕС Компетітор і РЖТ Сателія (по 41,5%), Ахілеа (41,4 %). Найбільший вміст олії у сортів Фріне (22,6%), Кобуко (22,3 %), АФК Темпо (22,1%), Атрактор і Крістіан (по 22,0%), а також ОАЦ Кенді, Покахонтас, Сассекс і Смарагд, у яких цей показник становив 21,9% [96].

У результаті досліджень, проведених українськими науковцями, встановлено, що серед скоростиглих та ультраскоростиглих сортів сої, занесених до Державного реєстру сортів рослин України станом на 2021 рік, найвищою стійкістю до хвороб на рівні 9 балів – характеризувалися сорти Авантюрин, Кобза, Діона, Аррата, Рогізнянка та Арніка. Водночас найбільш сприйнятливими до ураження хворобами виявилися сорти Легенда із показником 8 балів та Геба – 8,5 балів.

Більшість сортів сої ранньостиглої групи стиглості відзначалися високою стійкістю до хвороб, за винятком сортів Галлек, Опус і Вільшанка. Для середньоранньостиглих сортів середній показник стійкості до хвороб становив 8,6 бала. Максимальний рівень стійкості 9 балів був зафіксований у 97 сортів сої. Найнижчі показники стійкості мали сорти Артеміда 6 балів, а також Асука і Витязь 50 – по 7 балів. У сортів середньостиглої групи рівень стійкості до хвороб коливався в межах 7-9 балів [97].

В умовах сучасного виробництва є можливість обрати сорти сої, що поєднують високу продуктивність, стійкість до найпоширеніших хвороб та добрі

показники якості насіння, що свідчить про їх значний потенціал для вирощування в Лівобережному Лісостепу України.

У системі захисту сої від грибкових і бактеріальних хвороб важливе значення мають глибока зяблева оранка та ретельне загортання рослинних решток у ґрунт, оскільки саме вони часто є джерелом інфекції. Такі заходи сприяють істотному зниженню ризику поширення аскохітозу, пероноспорозу. У разі виявлення фузаріозу на полі повторне вирощування сої на цій ділянці рекомендується не раніше ніж через 2-3 роки. Високу ефективність у профілактиці хвороб також забезпечує передпосівне протруювання насіння.

Під час вирощування сої необхідно дотримуватися просторової ізоляції від культур, які мають спільних збудників хвороб. Посіви сої доцільно розміщувати не ближче ніж за 1 км від багаторічних бобових трав та інших зернобобових культур. Не рекомендується висівати сою поблизу полів із зернобобовими культурами, ураженими хворобами, а також поряд із ділянками, де такі культури вирощувалися у попередньому році.

Дотримання просторової ізоляції допомагає запобігти поширенню аерогенних грибних і бактеріальних інфекцій та суттєво обмежує розвиток вірусних захворювань, насамперед, вірусу жовтої мозаїки.

Передпосівне протруювання насіння сої фунгіцидними препаратами не забезпечує повного захисту рослин від хвороб, проте є важливим та економічно доцільним елементом технології вирощування культури. Застосування протруйників сприяє кращому проростанню насіння за несприятливих умов та забезпечує захист сходів від ґрунтових патогенів, зокрема збудників фузаріозу. Особливо актуальним цей захід є в умовах надмірно вологої погоди навесні, коли активність ґрунтової інфекції значно зростає.

За появи перших симптомів ураження хворобами необхідно оперативно розпочати профілактичні обробки посівів сої фунгіцидами, дозволеними до використання в Україні. Протягом вегетаційного періоду зазвичай достатньо однієї або двох обробок, що дає змогу істотно знизити шкодочинність хвороб і мінімізувати їх вплив на рослини. Для підвищення ефективності захисту та

посилення стійкості сої до хвороб під час внесення фунгіцидів доцільно додавати до робочого розчину регулятори росту рослин.

Для ефективного захисту сої необхідно сфокусуватися на трьох критичних етапах: підготовка насіння – протруювання для запобігання плісняві, гнилям (кореневим/стебловим), антракнозу; початок цвітіння – період прихованого розвитку інфекцій (септоріоз), коли симптоми ще відсутні, але зараження вже відбувається; формування бобів – етап повторного зараження, у цей час дія попереднього фунгіцидного захисту завершується, що вимагає особливого контролю.

Зазвичай перша фунгіцидна обробка посівів сої припадає на початок цвітіння. Профілактичне обприскування рекомендується розпочинати на етапі бутонізації або за перших симптомів інфекції. При вирощуванні ультрастиглих сортів сої зазвичай планують лише одноразове внесення фунгіциду.

Сорти сої з тривалістю періоду вегетації понад 100 діб в умовах високої вологості та підвищених температур потребують дворазового внесення фунгіциду: у фазу бутонізації – початку цвітіння та на етапі завершення цвітіння – початку формування бобів. Для боротьби з септоріозом, пероноспорозом та фузаріозом використовують фунгіциди системної дії Фортеця ЕС к.е. (0,5-1,0 л/га), Альто супер 330 ЕС к.е. (0,4 л/га), Рекс дуо к.е. (0,5 л/га), Топсін М з.п. (0,8 кг/га).

Посилення уваги до фітосанітарного стану сої обумовлене високим ризиком переходу інфекції з вегетативних органів на репродуктивні. Ураження стебел і листя неминуче спричиняє інфікування бобів, що призводить до кумулятивного ефекту, а саме зниження врожайності та посівних і товарних характеристик зерна. Сучасна стратегія захисту має базуватися на інтегрованому підході, що гарантує баланс між економічною доцільністю та екологічною безпекою [98-102].

Соя упродовж вегетаційного періоду уражується значною кількістю шкідників, які можуть пошкоджувати рослини на різних фазах розвитку та суттєво знижувати врожайність і якість насіння. Серед шкідників найбільш

поширені павутинний кліщ, акацієва вогнівка, бульбочкові довгоносики, совки. Найбільших втрат посівам завдають шкідники у періоди сходів, цвітіння та формування бобів.

Павутинний кліщ один із найнебезпечніших шкідників сої, особливо в умовах спекотної та сухої погоди. Кліщ пошкоджує листки, висмоктуючи клітинний сік, унаслідок чого листки жовтіють, підсихають, передчасно опадають. За сильного пошкодження істотно знижується врожайність. На посівах сої кліщ поширюється від фази бутонізації до повного досягання культури. Імаго та личинки живляться соком листків, у результаті чого посилюється транспірація, порушується водний баланс рослин, а також пригнічується процес фотосинтезу. Тривалість життя самки становить до 40 діб. Щоденно вона відкладає на нижньому боці листків від 3 до 8 яєць, причому зі зростанням температури повітря інтенсивність яйцекладки підвищується. За вегетаційний період шкідник здатний сформувати 10-12 поколінь.

Для боротьби з павутинним кліщем на посівах сої застосовують акарицидні препарати, серед яких поширеними є Омайт 570, 57% в.е. – 1,5 л/га, Ніссоран, 10% з.п. – 0,5 кг/га, Санмайт, 20% з.п. – 0,9 л/га, Талстар, 10% к.е. – 0,3 л/га та Нурел Д к.е. – 0,8 л/га. Для запобігання виникненню резистентності у павутинного кліща рекомендується чергувати препарати [103, 104].

Акацієва вогнівка особливо є небезпечною у період формування та наливу бобів, гусениці пошкоджують боби та насіння сої, проникаючи всередину. Уражене насіння втрачає товарні й посівні якості. За сприятливих умов для розвитку шкідника втрати врожаю можуть бути значними й досягати 30-50%. Для зменшення шкодочинності важливе значення мають дотримання сівозміни, знищення рослинних решток, своєчасний моніторинг посівів та застосування інсектицидів.

Бульбочкові довгоносики – жуки пошкоджують сім'ядолі та листки, а личинки живляться бульбочками на коренях, що негативно впливає на азотфіксацію. Внаслідок цього порушується діяльність бульбочкових бактерій та знижується процес біологічної фіксації атмосферного азоту. Пошкодження

кореневої системи погіршує азотне живлення рослин, уповільнює їх розвиток і негативно впливає на формування врожаю. Особливо небезпечними бульбочкові довгоносики є на ранніх етапах розвитку сої, коли рослини найбільш чутливі до пошкоджень. За значного заселення посівів можуть спостерігатися зрідження сходів, відставання рослин у рості та істотне зниження врожайності.

У сої боби можуть пошкоджуватися гусеницями люцернової совки, яка найбільш поширена в зоні Лісостепу. Самки першого покоління відкладають яйця наприкінці травня, тоді як другого – у другій половині липня. Упродовж липня-серпня гусениці живляться переважно генеративними органами різних культур, зокрема й бобами сої. Найсприятливішими умовами для розвитку шкідника є спекотна та посушлива погода. Масове заселення посівів совкою, зазвичай, спостерігається у випадках, коли ураженою була культура-попередник. Потенційну шкодочинність люцернової совки визначають шляхом обстеження ґрунту на наявність лялечок. Такі дослідження проводять у період до 15-25 липня, що дає можливість оцінити чисельність і щільність заселення шкідника.

За сприятливих погодних умов для розвитку шкідників акацієва вогнівка та люцернова совка здатні знищити до 50% урожаю сої лише за один тиждень.

В умовах Лівобережного Лісостепу особливого значення набуває система захисту рослин від бур'янів, шкідників і хвороб. Ефективний захист посівів забезпечує збереження продуктивного потенціалу культури та покращення якості продукції. Система захисту сої від шкідників включає дотримання правильного чергування культур у сівозміні, зокрема висівання сої після культур, які не мають із нею спільних шкідників. Нові посіви рекомендується розміщувати якомога далі від минулорічних площ сої та лісосмуг із акацією, а повернення культури на попереднє місце вирощування здійснювати не раніше, ніж через 3-4 роки.

Ефективними заходами є також знищення рослинних решток, проведення глибокої зяблевої оранки, протруювання насіння препаратами комплексної дії або внесення ґрунтових інсектицидів одночасно із сівбою за дотримання оптимальних строків та глибини загортання насіння. Такі агротехнічні й хімічні

прийоми вирощування культури сприяють зменшенню чисельності шкідників та рівня їх шкодочинності.

Економічно доцільним є крайове обприскування посівів сої під час появи сходів і в період вегетації для контролю комплексу шкідників. Під час захисту посівів також рекомендується застосовувати акарициди з різними механізмами токсичної дії, що підвищує ефективність боротьби зі шкідливими організмами [105-107].

Збирання сої проводять у фазі повної стиглості, коли більшість бобів набуває характерного для сорту забарвлення, листки опадають, а вологість насіння знижується до 14-16%. Раннє збирання сої призводить до підвищення вологості насіння та збільшення витрат на його досушування, тоді як запізнення зі збиранням може спричинити розтріскування бобів і значні втрати врожаю. Сою збирають прямим комбайнуванням. Для зменшення втрат важливо правильно налаштувати збиральну техніку. Висота зрізу має бути мінімальною, оскільки нижні боби часто розміщуються близько до поверхні ґрунту. Особливу увагу приділяють швидкості руху комбайна та режиму роботи молотильного апарата, щоб уникнути травмування насіння. Найефективнішим способом мінімізувати втрати сої перед збиранням є вирощування сортів, стійких до розтріскування та осипання насіння [108].

У разі нерівномірного досягання посівів або значної забур'яненості можливе проведення десикації, яка прискорює дозрівання рослин, полегшує збирання та знижує вологість насіння. Найчастіше десикацію застосовують у разі нерівномірного досягання сої, значної забур'яненості посівів або за несприятливих погодних умов у період досягання. Оптимальним строком проведення є фаза початку повної стиглості, коли більшість бобів уже побуріла, а вологість насіння становить близько 30%. Збирання сої зазвичай проводять через 5-10 діб після обробки десикантом, залежно від погодних умов і препарату [109, 110].

Вирощування в одному господарстві сортів сої різних груп стиглості має суттєві переваги під час збирання врожаю. Такий підхід дозволяє рівномірно розподілити навантаження на збиральну техніку та зменшити втрати врожаю.

Після збирання насіння очищують, за потреби досушують до вологості 12-14% і закладають на зберігання. Післязбиральна обробка насіння сої є важливим етапом технології вирощування, спрямованим на збереження якості та посівних властивостей урожаю. Вона включає очищення, сортування, сушіння та підготовку насіння до зберігання або подальшого використання. Одразу після збирання насіння очищують від домішок, рослинних решток, пошкоджених зерен. Це сприяє покращенню його якості та запобігає самозігріванню під час зберігання. Для очищення використовують зерноочисні машини ОС 4,5А і СМ-4.

Сушіння здійснюють, дотримуючись оптимального температурного режиму, оскільки насіння сої легко травмується та втрачає схожість при перегріванні. Після сушіння насіння сортують, а за необхідності протруюють для захисту від хвороб і шкідників. Зберігають сою у сухих, добре вентильованих складських приміщеннях, контролюючи температуру та вологість повітря, щоб запобігти розвитку плісняви й шкідників [111, 112].

Таким чином, технологія вирощування сої є одним із основних факторів, що впливає на формування структури врожаю та рівень продуктивності культури. Реалізація генетичного потенціалу сорту залежить від оптимального поєднання агротехнічних заходів і ґрунтово-кліматичних умов вирощування. На формування врожайності сої впливають підбір сорту, система обробітку ґрунту, строки та способи сівби, норма висіву, система удобрення, інокуляція насіння, захист рослин від бур'янів, шкідників і хвороб, а також забезпеченість вологою та температурний режим.

Технологія вирощування повинна бути адаптована до конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Найбільш важливими факторами для сої є температура повітря та вологозабезпеченість у фазах цвітіння та наливу бобів.

При нестачі вологи та високих температурах у критичні періоди відбувається опадання квіток і бобів, що призводить до значного зниження урожайності.

Ефективна технологія вирощування сої забезпечує оптимальні умови для вегетації рослин, сприяє максимальній реалізації генетичного потенціалу сорту та формуванню високої і стабільної урожайності. Отже, ефективність вирощування сої у Лівобережному Лісостепу України визначається комплексним дотриманням елементів технології вирощування, адаптацією агротехнічних заходів до умов регіону та раціональним використанням природних ресурсів.

## SECTION 2. ECOLOGY

DOI: 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2.2.1

### **2.1 Технології зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту в міському середовищі**

#### **2.1.1 Вступ**

Пасажирський транспорт є однією з найважливіших складових міського середовища, оскільки саме він забезпечує щоденну мобільність населення, просторову доступність територій, зв'язок між житловими районами, місцями праці, закладами освіти, медичними установами, адміністративними центрами та об'єктами соціальної інфраструктури. Від якості пасажирських перевезень залежить не лише зручність пересування мешканців, а й ефективність функціонування міста як цілісної соціально-економічної системи. Місто, у якому транспорт працює нерегулярно, повільно або незручно для пасажирів, втрачає значну частину свого розвитку потенціалу: збільшується тривалість щоденних поїздок, зростає навантаження на вулично-дорожню мережу, погіршується доступність послуг і посилюється соціальна нерівність між районами.

Водночас пасажирський транспорт є одним із джерел негативного впливу на навколишнє середовище. Його функціонування супроводжується викидами забруднювальних речовин і парникових газів, шумовим навантаженням, споживанням енергетичних ресурсів, утворенням заторів, зношуванням дорожнього покриття, використанням значних площ міського простору та погіршенням якості повітря в районах інтенсивного руху. Особливо гостро ці проблеми проявляються у великих містах, де висока щільність населення поєднується з великою кількістю щоденних переміщень, зростанням автомобілізації, нерівномірністю пасажиропотоків і обмеженістю транспортної інфраструктури.

Актуальність теми зумовлена необхідністю пошуку таких технологічних і організаційних рішень, які дозволяють одночасно забезпечити якісні пасажирські перевезення та зменшити екологічне навантаження на міське

середовище. Традиційне розуміння розвитку транспорту як простого збільшення кількості транспортних засобів або розширення дорожньої мережі вже не відповідає сучасним екологічним і соціальним викликам. Розвиток міської мобільності має бути спрямований не лише на переміщення транспортних засобів, а насамперед на забезпечення доступності для людей за мінімального негативного впливу на довкілля. Саме тому особливого значення набувають технології екологізації пасажирського транспорту: електрифікація рухомого складу, використання енергоефективних транспортних засобів, оптимізація маршрутів, цифрове управління рухом, розвиток мультимодальних пересадкових вузлів, пріоритет громадського транспорту, пішохідна та велосипедна інфраструктура.

Сутність проблеми полягає в тому, що екологічний ефект транспортної системи не визначається лише типом двигуна або видом пального. Навіть сучасний транспортний засіб може використовуватися неефективно, якщо маршрутна мережа побудована нерационально, інтервали руху не відповідають реальному попиту, відсутній пріоритет громадського транспорту, пересадки є незручними, а пасажир не має достатньої інформації про роботу системи. З іншого боку, добре організована система громадського транспорту здатна зменшити кількість поїздок приватними автомобілями, скоротити затори, знизити питомі викиди на одного пасажир та підвищити якість міського середовища. Отже, технології зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту мають розглядатися комплексно — як сукупність технічних, цифрових, інфраструктурних і управлінських рішень.

Особливе місце в цій проблематиці займає електрифікація міського пасажирського транспорту. Електробуси, трамваї та троллейбуси дають змогу зменшити локальні викиди в межах міста, знизити шумове навантаження та підвищити енергоефективність перевезень. Проте впровадження таких технологій потребує не лише закупівлі рухомого складу, а й розвитку зарядної або тягової інфраструктури, модернізації депо, підготовки персоналу, адаптації маршрутів, оцінювання енергоспоживання та врахування умов експлуатації.

Якщо ці складові не узгоджені між собою, очікуваний екологічний результат може бути неповним або економічно необґрунтованим.

Не менш важливими є цифрові інструменти управління транспортною системою. GPS моніторинг, електронний квиток, автоматизований облік пасажиропотоків, адаптивне керування світлофорами та цифрові сервіси планування поїздок дозволяють зробити громадський транспорт більш передбачуваним, регулярним і зручним. Вони також створюють інформаційну основу для прийняття управлінських рішень: визначення перевантажених напрямків, виявлення неефективних рейсів, зміни інтервалів руху, оптимізації маршрутної мережі та підвищення якості обслуговування пасажирів. У цьому аспекті цифровізація є не самоціллю, а інструментом зменшення транспортного навантаження та підвищення екологічної ефективності перевезень.

Важливо враховувати, що екологізація пасажирського транспорту неможлива без зміни транспортної поведінки населення. Якщо громадський транспорт є повільним, нерегулярним, незручним або недостатньо інтегрованим з іншими видами пересування, мешканці міста продовжують надавати перевагу приватному автомобілю. Тому екологічні технології повинні поєднуватися з підвищенням якості транспортної послуги. Пасажир має отримати реальну альтернативу автомобілю: швидку, надійну, доступну, безпечну та зрозумілу систему пересування. Лише за таких умов технологічні рішення можуть забезпечити не локальний, а системний екологічний ефект.

Актуальність дослідження також визначається необхідністю оцінювання екологічної ефективності транспортних рішень за коректними показниками. Недостатньо порівнювати транспортні засоби лише за загальним обсягом викидів або типом енергоносія. Важливо враховувати питомі викиди на одного пасажирів, витрати енергії на пасажиро-кілометр, завантаженість рухомого складу, довжину маршруту, режим руху, частоту зупинок, життєвий цикл транспортного засобу та інфраструктурні витрати. Такий підхід дозволяє уникнути спрощених висновків і обґрунтувати ті рішення, які справді зменшують негативний вплив транспорту на довкілля.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному розгляді технологій зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту не лише як сукупності окремих технічних засобів, а як взаємопов'язаної системи рішень, що охоплює рухомий склад, енергетичну інфраструктуру, цифрове управління, маршрутну мережу, організацію пересадок, пріоритет громадського транспорту та поведінку пасажирів. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарної оцінки окремих технологій до системного бачення екологізації міської мобільності.

Практична значущість дослідження полягає в можливості використання його положень для обґрунтування рішень щодо оновлення рухомого складу, розвитку електротранспорту, впровадження цифрових систем управління, оптимізації маршрутної мережі, формування пересадкових вузлів і підвищення пріоритету громадського транспорту. Результати можуть бути корисними для органів місцевого самоврядування, транспортних підприємств, проєктувальників міської інфраструктури та фахівців, які займаються питаннями екологічної безпеки і сталої мобільності.

Метою дослідження є обґрунтування технологічних, цифрових та організаційних підходів до зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту в міському середовищі з урахуванням потреб пасажирів, умов експлуатації транспортної системи та необхідності підвищення якості міського довкілля.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань: визначити основні екологічні проблеми пасажирського транспорту в містах; охарактеризувати сучасні технології екологізації рухомого складу; розкрити роль цифрових інструментів у зменшенні транспортного навантаження; проаналізувати організаційні рішення сталої міської мобільності; запропонувати підходи до оцінювання екологічної ефективності транспортних рішень; сформулювати практичні рекомендації щодо комплексного впровадження технологій екологізації пасажирських перевезень.

Об'єктом дослідження є система пасажирського транспорту міста як складова урбанізованого середовища. Предметом дослідження є технології,

цифрові інструменти та організаційні рішення, спрямовані на зменшення екологічного впливу пасажирських перевезень. Методологічну основу становлять системний підхід, порівняльний аналіз, оцінювання питомих екологічних показників, аналіз життєвого циклу транспортних рішень і узагальнення практик сталої міської мобільності.

Таким чином, вступ визначає актуальність і логіку дослідження, окреслює сутність проблеми, формулює мету, завдання, об'єкт і предмет роботи. Подальший виклад спрямований на послідовний аналіз екологічних проблем пасажирського транспорту, сучасних технологій його екологізації, цифрових інструментів управління транспортним навантаженням, організаційних рішень сталої мобільності та методів оцінювання екологічної ефективності.

Окремої уваги потребує питання просторової організації міської мобільності. Екологічний вплив пасажирського транспорту значною мірою залежить від того, як у місті розміщені житлові райони, робочі місця, заклади освіти, торговельні об'єкти та транспортнопересадкові вузли. Якщо місто має розтягнуту просторову структуру, а основні центри тяжіння розташовані далеко один від одного, кількість і довжина щоденних поїздок зростають. У таких умовах навіть екологічно чистіші транспортні засоби не завжди забезпечують достатній результат, оскільки загальний обсяг транспортної роботи залишається високим. Тому екологізація пасажирського транспорту повинна поєднуватися з принципами компактного міського розвитку, змішаного використання територій і формування районів, у яких значна частина повсякденних потреб може задовольнятися без тривалих поїздок.

Важливим напрямом зменшення екологічного навантаження є підвищення привабливості громадського транспорту порівняно з приватним автомобілем. Для цього недостатньо лише оновити рухомий склад або збільшити кількість транспортних засобів на маршрутах. Необхідно забезпечити регулярність руху, зрозумілу тарифну систему, зручні пересадки, доступність зупинок, безпеку пасажирів і стабільну якість обслуговування протягом усього дня. Якщо пасажир не впевнений у часі прибуття транспорту, змушений довго чекати на пересадку

або не має зручної інформації про маршрут, він частіше обирає автомобіль. Отже, екологічний ефект громадського транспорту безпосередньо пов'язаний із сервісною якістю, а не лише з технічними параметрами транспортних засобів.

Слід також враховувати соціальний вимір екологізації пасажирського транспорту. Транспортна система повинна бути доступною для різних груп населення: людей похилого віку, осіб з інвалідністю, дітей, студентів, працівників із різним графіком зайнятості та мешканців віддалених районів. Екологічні заходи не повинні призводити до погіршення транспортної доступності або зростання соціальної нерівності. Наприклад, обмеження використання приватних автомобілів матимуть позитивний результат лише тоді, коли місто пропонує реальну альтернативу у вигляді якісного громадського, велосипедного та пішохідного сполучення. Тому сталість транспортної системи має оцінюватися одночасно за екологічними, економічними та соціальними критеріями.

Енергетичний аспект проблеми також є принциповим. Перехід до електробусів, трамваїв, тролейбусів або інших електрифікованих видів транспорту зменшує локальні викиди в міському середовищі, однак загальний екологічний результат залежить від джерел виробництва електроенергії, втрат у мережі, режимів заряджання, ресурсу акумуляторів і організації технічного обслуговування. Якщо електроенергія виробляється переважно з викопного палива, частина екологічного навантаження переноситься за межі міста, але не зникає повністю. Саме тому оцінювання електрифікації повинно враховувати не тільки відсутність вихлопних газів на маршруті, а й повний ланцюг енергозабезпечення.

У контексті міського середовища важливим є також шумове забруднення. Навіть за умови зменшення хімічних викидів транспорт може залишатися джерелом постійного акустичного навантаження. Шум впливає на якість життя, працездатність, сон і загальний стан здоров'я мешканців. Електричний транспорт зазвичай є тихішим на малих швидкостях, однак на більших швидкостях значну роль відіграють шум шин, рейок, дорожнього покриття та організації руху. Отже, технології екологізації мають охоплювати не лише

двигуни й паливо, а й якість інфраструктури, стан дорожнього покриття, конструкцію зупинок, обмеження швидкості та планування транспортних коридорів.

Цифровізація відкриває додаткові можливості для зменшення негативного впливу транспорту. Дані про пасажиропотоки, швидкість руху, затримки, завантаженість транспортних засобів і пересадки дають змогу точніше налаштувати маршрутну мережу. На основі таких даних можна визначати ділянки з надмірним дублюванням маршрутів, виявляти напрямки з нестачею пропозиції, коригувати інтервали руху та планувати пріоритет громадського транспорту на перехрестях. У результаті транспортна система може працювати з меншими витратами енергії, нижчими питомими викидами та кращим рівнем обслуговування пасажирів.

Разом із тим цифрові інструменти не повинні розглядатися як самостійне вирішення екологічних проблем. Вони ефективні лише тоді, коли поєднуються з реальними управлінськими рішеннями: виділеними смугами для громадського транспорту, адаптивним світлофорним регулюванням, інтегрованими тарифами, оновленням рухомого складу та розвитком пересадкової інфраструктури. Дані самі по собі не зменшують викиди, але вони дозволяють приймати точніші рішення, уникати неефективних витрат і спрямовувати ресурси на ті заходи, які дають найбільший екологічний і соціальний результат.

Значення теми посилюється тим, що транспортні рішення мають довгостроковий характер. Закупівля рухомого складу, будівництво трамвайних ліній, створення зарядної інфраструктури, реконструкція вулиць або запровадження нової маршрутної мережі впливають на місто протягом багатьох років. Помилки на етапі планування можуть призвести до неефективного використання коштів, збереження високого рівня викидів і втрати довіри населення до громадського транспорту. Тому обґрунтування технологій зменшення екологічного впливу повинно спиратися на системний аналіз, а не на короткострокові або фрагментарні рішення.

Для цієї роботи важливо показати, що екологізація пасажирського транспорту є не одноразовим технічним заходом, а послідовним процесом перетворення міської мобільності. Він передбачає поєднання оновлення рухомого складу, розвитку інфраструктури, цифрового управління, зміни транспортної поведінки, удосконалення тарифної політики та підвищення якості міського простору. Лише комплекс таких дій може забезпечити стійке скорочення негативного впливу транспорту на довкілля й водночас зберегти або покращити доступність міста для населення.

### **2.1.2 Аналіз літератури**

Аналіз наукової літератури з проблематики зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту засвідчує, що ця тема сформувалася на перетині кількох дослідницьких напрямів: теорії сталої мобільності, екологічного оцінювання транспортних систем, аналізу життєвого циклу транспортних технологій, цифровізації міського транспорту, управління пасажиропотоками та планування інтегрованих транспортних послуг. Для цього дослідження важливо не лише перелічити наявні праці, а й визначити, які саме аспекти проблеми вони розкривають, які методологічні підходи пропонують і які прогалини залишаються невирішеними.

Базовим для розуміння теми є підхід D. Vanister, який сформулював парадигму сталої мобільності як альтернативу традиційному транспортному плануванню, орієнтованому переважно на пропускну здатність і швидкість руху транспортних засобів [113]. Цінність цієї праці полягає в тому, що автор переносить акцент із транспортного потоку на потреби людини, доступність, якість середовища та зменшення екологічних наслідків. Для нашого дослідження це принципово важливо, оскільки екологізація пасажирського транспорту не може зводитися лише до технічної заміни рухомого складу. Вона повинна охоплювати зміну самої логіки міської мобільності.

Праця R. Nickman, P. Hall і D. Vanister розвиває цю ідею в контексті планування сталої мобільності [114]. Автори показують, що досягнення сталих результатів потребує не окремих заходів, а послідовної транспортної політики,

яка поєднує просторове планування, розвиток громадського транспорту, управління попитом і екологічні обмеження. Сильним аспектом цього підходу є системність, однак він потребує конкретизації на рівні технологій, які можуть бути впроваджені в пасажирському транспорті конкретного міста.

У роботі L. Schipper і L. Fulton громадський транспорт розглядається як потенційно ключовий інструмент скорочення екологічного навантаження міських перевезень [115]. Автори акцентують увагу на тому, що один і той самий вид транспорту може мати різну екологічну ефективність залежно від організації системи, завантаженості, структури маршрутів і політики міста. Це положення важливе для нашої теми, оскільки підтверджує необхідність оцінювати транспорт не лише за типом двигуна, а й за фактичною роллю в міській мобільності.

Дослідження S. Zahabi, L. Miranda-Moreno, Z. Patterson і P. Barla розкриває зв'язок між викидами міського транспорту, міською формою, доступністю громадського транспорту та зеленими технологіями [116]. Праця є важливою тим, що поєднує екологічні показники з просторовими характеристиками міста. Водночас вона демонструє: навіть екологічно чистіші транспортні технології не забезпечують повного ефекту, якщо міська структура стимулює довгі й автомобілеорієнтовані поїздки. Для нашого дослідження це означає, що технологічні рішення мають аналізуватися разом із маршрутною мережею і доступністю громадського транспорту.

Окремий блок джерел присвячений оцінюванню життєвого циклу транспортних засобів. E. Zhao, P. Walker і N. Surawski порівнюють дизельні, гібридні та електричні автобуси з позицій емісій життєвого циклу [117]. Важливість цієї праці полягає в тому, що вона не обмежується фазою експлуатації, а враховує ширший екологічний слід технології. Для нашої роботи це є методологічним орієнтиром: електробус не можна автоматично вважати повністю екологічним без аналізу джерел електроенергії, виробництва акумуляторів і умов експлуатації.

A. Lajunen досліджує життєву вартість і викиди CO<sub>2</sub> для дизельних, газових, гібридних, водневих і електричних міських автобусів [118]. Сильна сторона цієї роботи полягає у комплексному порівнянні різних технологій. Автор показує, що вибір рухомого складу повинен враховувати не лише екологічні, а й економічні параметри. Для міських транспортних систем це особливо важливо, оскільки бюджетні обмеження можуть впливати на темпи оновлення парку та вибір технологічної стратегії.

A. Nordelof та співавтори аналізують екологічні впливи гібридних, plug-in hybrid і battery electric vehicles з позицій life cycle assessment [119]. Праця має оглядовий характер і є цінною тим, що систематизує методологічні проблеми оцінювання електрифікованого транспорту. Для нашого дослідження важливо, що автори наголошують на залежності результатів LCA від меж системи, припущень щодо енергетичного балансу, строку служби акумуляторів і сценаріїв утилізації.

T. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez і A. Stromman здійснюють порівняльну екологічну оцінку традиційних та електричних транспортних засобів [120]. Дослідження демонструє, що електрифікація може зменшувати локальні викиди, але водночас переміщувати частину екологічного навантаження на етап виробництва електроенергії та акумуляторів. Це підтверджує необхідність обережного використання категорії «нульові викиди» щодо електротранспорту.

M. Chester і A. Horvath підкреслюють, що екологічне оцінювання пасажирського транспорту має включати інфраструктуру та ланцюги постачання [121]. Ця праця є особливо важливою для теми міського пасажирського транспорту, оскільки трамвайні колії, контактна мережа, зарядні станції, депо та дорожня інфраструктура також мають власний екологічний слід. Отже, порівняння технологій без урахування інфраструктури може бути неповним.

Праця A. Nordelof, E. Grunditz, A.-M. Tillman, T. Thiringer і M. Alatalo присвячена інвентаризації життєвого циклу електричних тягових машин [122]. Вона деталізує технічний рівень аналізу електричних компонентів транспортних

засобів. Для нашого дослідження це джерело важливе як підтвердження того, що екологічна оцінка електротранспорту потребує врахування не лише акумулятора, а й інших елементів електричної силової установки.

M. Yan та співавтори здійснюють комплексну оцінку життєвого циклу dual-source pure electric bus [123]. Їхній внесок полягає у фокусі саме на електробусах як елементі громадського транспорту. Робота показує, що ефективність електробуса залежить від технології живлення, експлуатаційного режиму та енергетичного контексту. Це безпосередньо пов'язано з нашим дослідженням, оскільки електробуси розглядаються як одна з основних технологій екологізації пасажирських перевезень.

Ще одна робота A. Nordelof та співавторів присвячена моделюванню завершення життєвого циклу літій-іонних акумуляторів [124]. Вона звертає увагу на проблему утилізації, повторного використання та переробки батарей. Для екологізації пасажирського транспорту це питання є критичним, адже масове впровадження електробусів неминуче створює потребу в управлінні акумуляторними відходами.

Q. Liu та співавтори досліджують викиди сучасного міського автобусного парку в реальних дорожніх умовах [125]. Цінність цієї праці полягає в тому, що вона переносить аналіз із лабораторних умов у реальне міське середовище. Для нашої теми це важливо, оскільки фактичні викиди залежать від маршруту, зупинок, заторів, стану транспортного засобу та стилю водіння.

C. Osorio і K. Nanduri досліджують можливості зменшення транспортних викидів через оптимізацію світлофорного регулювання з використанням високороздільних моделей руху та емісій [126]. Праця має важливе методологічне значення, оскільки демонструє зв'язок між мікрорівнем організації руху й екологічними результатами. Для нашої роботи це підтверджує, що цифрові інструменти управління транспортними потоками можуть бути реальним елементом екологізації.

S. Colak, A. Lima і M. Gonzalez аналізують природу перевантажених поїздок у міських районах [127]. Автори показують, що затори мають складну

просторово-часову структуру, а тому не можуть бути подолані лише локальним розширенням доріг. Для пасажирського транспорту це означає необхідність переходу до управління попитом, пріоритету громадського транспорту та координації маршрутів.

I. Philips, J. Anable і T. Chatterton оцінюють вплив політик переходу до сталої мобільності на накопичені міські транспортні викиди та енергетичний попит [128]. Важливість цієї праці полягає в тому, що вона аналізує не миттєвий, а кумулятивний ефект політик. Для нашого дослідження це корисно, оскільки екологізація транспорту має оцінюватися як довгостроковий процес, а не як разова модернізація парку.

O. Asensio та співавтори показують можливості використання даних мобільних платформ для оцінювання сталої транспортної інфраструктури [129]. Це джерело посилює аргументацію щодо ролі цифрових даних у прийнятті рішень. Його значення полягає в тому, що екологічна ефективність інфраструктури може оцінюватися не лише за проектними параметрами, а й за фактичною поведінкою користувачів.

Zheng, L. Capra, O. Wolfson і H. Yang розкривають концепцію urban computing як методологічну основу аналізу міських процесів через великі дані [130]. Для транспортної тематики ця праця важлива тим, що показує можливості інтеграції даних про переміщення, інфраструктуру та поведінку користувачів. У контексті нашого дослідження urban computing створює основу для цифрового управління пасажиропотоками.

Yao та співавтори аналізують використання масивів мобільних даних для розуміння міської активності й патернів мобільності [131]. Ця робота є релевантною для оцінювання реального попиту на перевезення. Вона дозволяє зробити висновок, що маршрутна мережа має формуватися не лише за нормативними схемами, а й на основі фактичної просторово-часової поведінки населення.

F. Dembski та співавтори досліджують міські цифрові двійники на прикладі Herrenberg [132]. У контексті екологізації пасажирського транспорту цифровий

двійник може використовуватися для моделювання сценаріїв зміни маршрутів, пріоритету громадського транспорту, розміщення зарядної інфраструктури та оцінки впливу на міське середовище. Водночас ця технологія потребує якісних даних і міжвідомчої інтеграції.

R. Mugion та співавтори досліджують, чи підвищує якість послуг міського громадського транспорту сталість мобільності [133]. Праця є ключовою для розуміння поведінкового аспекту теми. Вона демонструє, що екологічні переваги громадського транспорту реалізуються лише тоді, коли пасажир сприймає його як якісну, надійну й комфортну послугу. Для нашого дослідження це означає: екологізація неможлива без сервісної якості.

A. Awasthi, H. Omrani і P. Gerber розглядають багатокритеріальне оцінювання проєктів міської мобільності [134]. Це джерело корисне тим, що пропонує підхід до вибору транспортних рішень за сукупністю критеріїв. У темі пасажирського транспорту такими критеріями можуть бути викиди, вартість, доступність, соціальна прийнятність, енергоефективність і вплив на міське середовище.

Lopez-Carreiro і A. Monzon оцінюють сталість та інноваційність мобільних патернів міст різного розміру й типології [135]. Їхня робота важлива тим, що підкреслює залежність транспортних рішень від масштабу та типу міста. Отже, технології екологізації не можуть автоматично переноситися з одного міста в інше без урахування локальних характеристик.

Curiel-Esparza та співавтори досліджують пріоритезацію покращень для сталої мобільності в міських районах [136]. Праця важлива з погляду управління, оскільки в реальній політиці міста не можуть одночасно реалізувати всі заходи. Необхідно визначати, які рішення дадуть найбільший екологічний і соціальний ефект за наявних ресурсів.

R. Zope, N. Vasudevan, S. Arkatkar і G. Joshi пропонують benchmarking як інструмент оцінювання сталості міських транспортних систем [137]. Для нашого дослідження це важливо як підхід до порівняння міст або транспортних

сценаріїв. Benchmarking дає змогу не лише описувати стан системи, а й визначати відставання від бажаних показників.

R. Okraszewska та співавтори аналізують інтеграцію багаторівневої моделі транспортної системи в планування сталої міської мобільності [138]. Ця праця важлива тим, що демонструє необхідність узгодження різних рівнів планування: стратегічного, мережевого, маршрутного й операційного. У нашій темі це означає, що екологізація має відобразитися і в стратегії міста, і в конкретних маршрутах.

A. Louro, N. da Costa і E. da Costa розглядають політики сталої міської мобільності як шлях до здорових міст [139]. Їхній підхід розширює екологічну проблематику до питання громадського здоров'я. Це важливо, оскільки зменшення викидів і шуму має кінцевою метою не лише поліпшення екологічних показників, а й підвищення якості життя населення.

C. Senne, J. Lima і F. Favaretto пропонують індекс сталості інтегрованого міського транспорту і логістики на прикладі Sao Paulo [140]. Цінність цієї праці полягає в кількісному підході до інтегрованої оцінки. Для нашої роботи вона підтверджує потребу в системі показників, яка охоплює не лише екологічні, а й організаційні параметри.

M. Mozos-Blanco та співавтори здійснюють порівняльний аналіз планів сталої мобільності в Іспанії [141]. Праця демонструє, що навіть за наявності спільної методології міста реалізують SUMP по-різному. Отже, успішність плану залежить від конкретних інструментів, інституційної спроможності та зв'язку між плануванням і впровадженням.

A. Glazener і H. Khreis аналізують практики трансформації міст у напрямі чистого повітря та активного транспорту [142]. Для дослідження пасажирського транспорту це джерело важливе тому, що підкреслює зв'язок між транспортною політикою, якістю повітря і фізичною активністю населення. Воно допомагає обґрунтувати інтеграцію громадського транспорту з пішохідною та велосипедною інфраструктурою.

M. Kiba-Janiak i J. Witkowski досліджують, як працюють плани сталої міської мобільності [143]. Праця важлива тим, що зміщує увагу з формального існування плану на механізми його реалізації. Для нашої теми це означає, що екологічні технології мають бути включені в управлінські процеси, фінансування, моніторинг і оцінювання результатів.

M. Namurcu i T. Eren розглядають вибір електробусів для сталої міської мобільності за допомогою багатокритеріального методу [144]. Це джерело безпосередньо стосується технологічного вибору. Воно підтверджує, що закупівля електробусів має спиратися на систему критеріїв: екологічних, економічних, технічних та експлуатаційних.

D. Esztergar-Kiss i T. Ker'enyi досліджують створення мобільних пакетів на основі концепції MaaS [145]. Ця праця важлива тим, що показує: інтеграція послуг може бути не лише технічною, а й тарифною та сервісною. Для пасажирів важливим є не окремий вид транспорту, а весь ланцюг поїздки.

G. Lyons, P. Hammond i K. Maskau підкреслюють роль користувацької перспективи в розвитку MaaS [146]. Для нашого дослідження це принципово, оскільки екологічні переваги цифрових сервісів реалізуються тільки тоді, коли користувачі готові змінювати власну транспортну поведінку. Отже, MaaS має оцінюватися не лише як технологічна платформа, а як інструмент впливу на вибір способу пересування.

P. Jittrapirom та співавтори здійснюють критичний огляд визначень MaaS, оцінок схем і ключових викликів [147]. Джерело важливе тим, що воно систематизує неоднозначність поняття MaaS. Для нашої роботи це дозволяє уникнути спрощення, за якого MaaS розуміється лише як мобільний застосунок. Насправді він передбачає інтеграцію операторів, тарифів, даних, сервісів і політик.

A. Durand та співавтори аналізують вплив MaaS на транспортні переваги та поведінку [148]. Праця важлива для визначення потенціалу MaaS у зменшенні автомобільної залежності. Водночас вона показує, що зміни поведінки не є

автоматичними: потрібні якісні альтернативи, довіра до сервісу та зручність пересадок.

R. Wimbadi, R. Djalante і A. Mori здійснюють систематичний огляд міських експериментів із громадським транспортом для низьковуглецевих переходів [149]. Це джерело узагальнює досвід впровадження змін у реальних міських умовах. Його значення полягає в тому, що воно демонструє експериментальний характер багатьох транспортних інновацій: міста тестують технології, змінюють політики, оцінюють реакцію користувачів і поступово формують сталі моделі мобільності.

Проведений аналіз 37 джерел дозволяє виокремити кілька ключових висновків. Поперше, у науковій літературі сформовано загальну рамку сталої мобільності, яка підкреслює необхідність переходу від автомобілеорієнтованого планування до людиноцентричної та екологічно орієнтованої транспортної політики [113–116]. По-друге, достатньо розвиненим є напрям оцінювання життєвого циклу транспортних технологій, особливо електричних, гібридних і водневих транспортних засобів [117–125]. По-третє, окремий блок досліджень присвячений цифровим інструментам, даним, управлінню рухом і моделюванню мобільності [126–132]. По-четверте, значну увагу приділено якості громадського транспорту, поведінці пасажирів, планам сталої мобільності та інтеграції транспортних послуг [133–149].

Водночас у наявних дослідженнях зберігається певна фрагментарність. Частина праць зосереджена на технологіях рухомого складу, частина — на цифровому управлінні, частина — на плануванні сталої мобільності, а частина — на поведінці користувачів. Недостатньо розробленим залишається комплексний підхід, у якому технології екологізації пасажирського транспорту розглядаються одночасно через рухомий склад, енергетичну інфраструктуру, маршрутну мережу, цифрові інструменти, якість послуги та зміну транспортної поведінки. Саме ця прогалина визначає напрям подальшого дослідження.

Отже, аналіз літератури підтверджує актуальність теми та показує, що зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту потребує системного

підходу. Найбільш перспективним є поєднання електрифікації, підвищення енергоефективності, оцінювання життєвого циклу, цифрового управління, інтегрованого планування та орієнтації на пасажера. Подальший виклад роботи спирається саме на цей висновок і спрямований на розкриття технологічних, організаційних та методичних аспектів екологізації пасажирського транспорту в міському середовищі.

Додатковий аналіз літератури дозволяє деталізувати, що поняття сталої міської мобільності в сучасних працях трактується значно ширше, ніж екологічне оновлення транспортних засобів. У більшості досліджень підкреслюється, що транспортна система повинна забезпечувати доступність, соціальну справедливість, економічну ефективність і зменшення негативного впливу на довкілля одночасно. Це означає, що екологізація пасажирського транспорту не може бути зведена лише до закупівлі електробусів або модернізації окремих маршрутів. Вона потребує зміни принципів планування, за яких пріоритет надається не максимальній пропускній здатності вулиць для автомобілів, а ефективному переміщенню людей з мінімальними екологічними витратами.

У працях, присвячених життєвому циклу транспортних технологій, особливо важливим є застереження щодо спрощених порівнянь між дизельними, гібридними, електричними та водневими транспортними засобами. Автори наголошують, що екологічні переваги електричного транспорту залежать від структури виробництва електроенергії, строку служби акумуляторів, інтенсивності використання рухомого складу, режиму заряджання та можливості повторного використання або перероблення компонентів. Для міського пасажирського транспорту це має практичне значення: транспортний засіб із нижчими локальними викидами не завжди автоматично є найкращим рішенням, якщо він використовується на маршруті з низьким пасажиропотоком, потребує надмірної резервної інфраструктури або має короткий строк ефективної експлуатації.

Окремий блок досліджень стосується взаємозв'язку між транспортними викидами та режимами руху. У літературі показано, що затори, часті зупинки,

нерівномірні прискорення, очікування на перехрестях і низька середня швидкість істотно збільшують енергоспоживання та викиди. Це стосується не лише автомобілів, а й автобусів, які працюють у загальному транспортному потоці. Тому заходи на кшталт виділених смуг, пріоритету громадського транспорту на світлофорах, раціонального розміщення зупинок і оптимізації розкладів можуть мати екологічний ефект, порівнюваний із технічним оновленням рухомого складу. Такий висновок є важливим для міст з обмеженими фінансовими ресурсами, де повна заміна парку потребує тривалого часу.

У наукових джерелах також простежується зростання уваги до цифрових даних як основи транспортного планування. GPS-моніторинг, мобільні дані, електронний квиток, автоматизований підрахунок пасажирів і цифрові моделі міста дозволяють оцінювати транспортну систему не за приблизними уявленнями, а за фактичною поведінкою користувачів. Такі дані допомагають виявити перевантажені напрямки, дублювання маршрутів, нерівномірність попиту протягом доби, слабкі пересадкові зв'язки та зони недостатньої транспортної доступності. Водночас література наголошує, що цифрові інструменти мають бути інтегровані в управлінський процес, інакше вони залишаються лише джерелом інформації без практичного впливу на екологічні показники.

Дослідження якості громадського транспорту демонструють, що екологічний результат значною мірою залежить від готовності пасажирів змінювати транспортну поведінку. Якщо громадський транспорт є повільним, нерегулярним, незручним або погано інтегрованим з іншими видами пересування, навіть екологічно модернізована система не зменшить суттєво частку приватного автомобіля. Тому в літературі значна увага приділяється надійності, частоті руху, комфортності, безпеці, доступності інформації, тарифній інтеграції та зручності пересадок. Ці параметри прямо впливають на вибір пасажирів і, відповідно, на загальний обсяг викидів у місті.

Аналіз праць зі сталого транспортного планування показує, що найбільш результативними є не ізольовані заходи, а пакети взаємопов'язаних рішень.

Наприклад, розвиток електротранспорту має поєднуватися з пріоритетом на вулицях, модернізацією депо, зарядною інфраструктурою, оновленням маршрутної мережі та інформаційними сервісами для пасажирів. Розвиток велосипедної і пішохідної інфраструктури має бути пов'язаний із пересадковими вузлами та зупинками громадського транспорту. Обмеження автомобільного руху має супроводжуватися доступною альтернативою. Саме комплексність є тією умовою, яка відрізняє реальну екологізацію від декларативного впровадження окремих технологій.

У літературі про інтегровану мобільність і *Mobility as a Service* підкреслюється, що майбутня транспортна система міста має розглядатися як єдиний сервіс, а не як набір розрізнених маршрутів і операторів. Інтеграція розкладів, тарифів, пересадок, цифрової оплати, громадського транспорту, велосипедів, пішохідних маршрутів і мікромобільності може зменшити залежність від приватного автомобіля. Однак автори також звертають увагу на ризики: цифрові сервіси можуть не досягти екологічної мети, якщо вони орієнтовані лише на зручність окремого користувача, але не пов'язані з міською політикою скорочення викидів і пріоритетом масових перевезень.

Порівняння різних груп джерел показує, що технічний, організаційний і поведінковий підходи часто розглядаються окремо. Технічні дослідження детально оцінюють рухомий склад, енергоспоживання і життєвий цикл, але не завжди враховують якість маршрутної мережі та поведінку пасажирів. Праці з транспортного планування аналізують просторову структуру, доступність і політику мобільності, але інколи недостатньо деталізують технологічні параметри транспорту. Дослідження цифровізації зосереджуються на даних і моделях, однак потребують зв'язку з практичними екологічними показниками.

Ця роз'єднаність підтверджує необхідність комплексної рамки дослідження.

Для теми цієї роботи особливо важливим є висновок про те, що екологічна ефективність повинна оцінюватися у питомих показниках. Загальний обсяг викидів транспортного засобу не дає повної картини без урахування пасажиромісткості, фактичної заповненості, довжини поїздки, режиму руху та

кількості заміщених автомобільних поїздок. Один автобус із високим завантаженням може бути значно ефективнішим за декілька малозавантажених транспортних засобів, навіть якщо кожен із них має сучасніший двигун. Так само електробус на нераціональному маршруті не забезпечить очікуваного системного ефекту, якщо він не приваблює пасажирів і не зменшує автомобільний трафік.

Узагальнення джерел дає підстави стверджувати, що сучасна наукова дискусія поступово переходить від питання «який транспортний засіб є екологічнішим» до питання «за яких умов транспортна система стає екологічнішою». Саме зміна рівня аналізу є принциповою. Вона дозволяє розглядати електрифікацію, цифровізацію, оптимізацію маршрутів, інтегровані тарифи, пересадкові вузли, активну мобільність і управління попитом як взаємопов'язані елементи. Для подальшого дослідження це означає необхідність оцінювати не лише окремі технології, а й механізми їх поєднання в межах міської транспортної політики.

Суттєвою дослідницькою прогалиною залишається недостатня увага до умов практичного впровадження екологічних технологій у містах із різними фінансовими, інфраструктурними та організаційними можливостями. Багато праць описують перспективні технології або успішні приклади, але менше уваги приділяють обмеженням: зношеності рухомого складу, дефіциту інвестицій, нестачі зарядної інфраструктури, складності координації між перевізниками, недостатній якості даних і опору змінам з боку користувачів. Для практичного застосування важливо враховувати ці бар'єри, оскільки саме вони часто визначають, чи перетворюється екологічна ідея на реальний результат.

Таким чином, аналіз літератури засвідчує, що зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту має розглядатися як багаторівнева задача. На технічному рівні вона охоплює вибір рухомого складу, енергетичну інфраструктуру та життєвий цикл. На організаційному рівні — маршрутну мережу, розклади, пересадки, пріоритет громадського транспорту та управління попитом. На цифровому рівні — збір і використання даних для прийняття рішень. На соціальному рівні — поведінку пасажирів, доступність послуг і

готовність населення користуватися альтернативами приватному автомобілю. Саме поєднання цих рівнів формує наукову основу подальшого дослідження.

Важливо також врахувати, що частина літератури акцентує увагу на відмінності між локальним і глобальним екологічним ефектом. Локальний ефект проявляється безпосередньо в місті: зменшення вихлопних газів, шуму, забруднення повітря поблизу житлової забудови та навантаження на вуличний простір. Глобальний ефект пов'язаний із повним обсягом парникових газів, виробництвом енергії, виготовленням транспортних засобів, будівництвом інфраструктури та утилізацією компонентів. Наукові джерела показують, що міська транспортна політика повинна враховувати обидва рівні, оскільки перенесення викидів за межі міста не означає повного розв'язання екологічної проблеми. Для пасажирського транспорту це особливо суттєво, адже саме він щоденно працює в безпосередній близькості до населення, але водночас спирається на складні енергетичні й виробничі ланцюги.

У дослідженнях, присвячених вибору технологій рухомого складу, часто підкреслюється необхідність багатокритеріального оцінювання. Екологічні показники мають зіставлятися з вартістю закупівлі, витратами на експлуатацію, надійністю, доступністю запасних частин, вимогами до персоналу, станом інфраструктури та можливістю масштабування. Наприклад, електробуси можуть мати високий екологічний потенціал, але їх ефективність залежить від правильної організації заряджання, запасу ходу, температурних умов, графіка руху і резервування парку. Трамвайні системи забезпечують значну провізну здатність і низькі локальні викиди, але потребують великих інфраструктурних інвестицій. Тролейбуси можуть бути компромісним рішенням для міст із наявною контактною мережею. Отже, універсального технологічного рішення не існує, а вибір має залежати від конкретних умов міста.

Окремий напрям літератури стосується інституційних умов упровадження сталої мобільності. Автори зазначають, що навіть технічно обґрунтовані рішення можуть не дати результату без координації між органами місцевого самоврядування, перевізниками, енергетичними компаніями,

проектувальниками, громадськістю та фінансовими установами. Транспортна система є міжгалузеву, тому її екологізація потребує узгодження тарифної політики, інвестиційних програм, містобудівних рішень, дорожньої організації та екологічного моніторингу. У цьому контексті важливою є не лише наявність технологій, а й здатність міста створити управлінський механізм для їх послідовного впровадження.

У працях про поведінку пасажирів підкреслюється, що транспортний вибір формується не тільки раціональним порівнянням часу і вартості поїздки. На нього впливають звички, уявлення про комфорт, престиж автомобіля, сприйняття безпеки, доступність інформації, досвід попередніх поїздок і довіра до транспортної системи. Тому екологічна політика має містити не лише інфраструктурні й технічні заходи, а й комунікацію з користувачами, підвищення прозорості роботи транспорту, зручні цифрові сервіси та стабільну якість обслуговування. Якщо пасажир бачить, що громадський транспорт є передбачуваним і зручним, готовність відмовитися від частини автомобільних поїздок зростає.

Значну роль у сучасних дослідженнях відіграє поняття транспортної доступності. На відміну від традиційного підходу, який оцінює переважно швидкість руху або пропускну здатність, доступність показує, наскільки легко мешканці можуть дістатися до потрібних послуг, робочих місць і соціальної інфраструктури. З екологічного погляду це означає, що найкращим рішенням не завжди є прискорення руху на великі відстані. Іноді ефективніше скоротити потребу в поїздках, поліпшити локальні зв'язки, розвинути пересадки або забезпечити доступність районів громадським транспортом. Такий підхід поєднує транспортне планування з міським розвитком і дозволяє зменшувати екологічне навантаження системно.

Узагальнюючи розглянуті джерела, можна зазначити, що література формує достатньо широку теоретичну базу для дослідження екологізації пасажирського транспорту. Водночас практична цінність цієї бази залежить від здатності поєднати різні підходи в єдину логіку аналізу. Для цього необхідно розглядати

транспортний засіб не ізолювано, а в маршруті; маршрут — не ізолювано, а в мережі; мережу — не ізолювано, а в міському просторі; цифрові інструменти — не як окрему технологію, а як механізм управління; екологічні показники — не як абстрактні величини, а як критерії прийняття рішень. Саме такий підхід дозволяє перейти від огляду літератури до формування цілісної дослідницької позиції.

Додатково слід зазначити, що література дедалі частіше розглядає пасажирський транспорт як елемент ширшої екологічної політики міста. Транспортні рішення пов'язані з якістю повітря, громадським здоров'ям, кліматичною адаптацією, використанням міського простору та енергетичною безпекою. Наприклад, скорочення автомобільного трафіку може одночасно зменшувати викиди, звільняти простір для пішохідної та велосипедної інфраструктури, підвищувати безпеку руху й покращувати умови перебування людей на вулицях. Тому в сучасних джерелах екологізація транспорту часто подається не як вузька технічна модернізація, а як складова підвищення якості міського життя.

Для подальшого дослідження важливо врахувати й те, що екологічна ефективність заходів може змінюватися в часі. Рішення, яке є оптимальним на початковому етапі, може потребувати перегляду після зміни пасажиропотоків, тарифної політики, структури енергопостачання або просторового розвитку міста. Саме тому в літературі підкреслюється значення моніторингу, регулярного оновлення даних і гнучкого управління транспортною системою. Екологізація не завершується після впровадження окремого проекту; вона потребує постійного оцінювання результатів і коригування рішень відповідно до фактичного попиту та екологічних показників.

У підсумку аналіз джерел підтверджує, що найбільш перспективним є системний підхід, який поєднує технологічні, цифрові, організаційні та поведінкові інструменти. Він дозволяє уникнути ситуації, коли окремі екологічні заходи впроваджуються без зв'язку з реальною роботою транспортної мережі. Для цієї роботи такий висновок є методологічно визначальним: подальший

розгляд має бути спрямований на виявлення умов, за яких технології зменшення екологічного впливу не лише покращують окремі показники рухомого складу, а й змінюють функціонування всієї системи пасажирських перевезень у міському середовищі.

### **2.1.3 Мета дослідження**

Після визначення актуальності теми та аналізу наукових джерел необхідно сформулювати дослідницьку рамку роботи. Вона охоплює мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження. Саме ці елементи задають логіку подальшого викладу, визначають межі аналізу та дозволяють уникнути надмірного розширення теми. Для проблематики екологізації пасажирського транспорту це особливо важливо, оскільки вона поєднує технічні, екологічні, організаційні, цифрові та соціальні аспекти. Без чіткого формулювання мети дослідження існує ризик звести роботу лише до опису окремих видів транспорту або до загального переліку екологічних проблем, тоді як основне завдання полягає у встановленні взаємозв'язку між технологічними рішеннями та їх реальним впливом на міське середовище.

Метою дослідження є обґрунтування технологічних, цифрових та організаційних підходів до зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту в міському середовищі з урахуванням якості транспортного обслуговування населення, енергоефективності перевезень, умов експлуатації рухомого складу та необхідності переходу до сталої міської мобільності.

Таке формулювання мети передбачає, що дослідження спрямоване не лише на характеристику окремих транспортних технологій, а на виявлення умов, за яких ці технології забезпечують системний екологічний результат. Наприклад, електробус може зменшувати локальні викиди, але його ефективність залежить від маршруту, завантаженості, джерел електроенергії, режиму заряджання, стану інфраструктури та здатності залучити пасажирів, які раніше користувалися приватними автомобілями. Аналогічно цифрові сервіси не мають самостійного екологічного ефекту, якщо вони не впливають на регулярність руху, оптимізацію маршрутів, зменшення заторів і підвищення привабливості громадського

транспорту. Тому мета дослідження має комплексний характер і передбачає поєднання технічного аналізу з оцінюванням організації транспортної системи.

Досягнення поставленої мети потребує послідовного виконання кількох взаємопов'язаних задач. У цій роботі доцільно виокремити чотири основні задачі дослідження:

1. Проаналізувати основні екологічні проблеми пасажирського транспорту в містах, зокрема викиди забруднювальних речовин і парникових газів, шумове навантаження, затори, неефективне споживання енергії та вплив транспорту на якість повітря й умови життя населення.

2. Охарактеризувати технології зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту, серед яких електрифікація рухомого складу, використання енергоефективних транспортних засобів, рекуперация енергії, розвиток зарядної або тягової інфраструктури та врахування життєвого циклу транспортних рішень.

3. Визначити роль цифрових та організаційних інструментів у підвищенні екологічної ефективності міських пасажирських перевезень, зокрема GPS-моніторингу, електронного квитка, аналізу пасажиропотоків, адаптивного керування рухом, оптимізації маршрутної мережі, пріоритету громадського транспорту і розвитку пересадкових вузлів.

4. Обґрунтувати підходи до оцінювання та практичного впровадження комплексних рішень екологізації пасажирського транспорту на основі питомих викидів, енерговитрат на пасажиро-кілометр, завантаженості рухомого складу, якості транспортної послуги та здатності системи зменшувати залежність населення від приватного автомобіля.

Перша задача формує проблемне поле дослідження. Вона дозволяє визначити, які саме види негативного впливу пасажирського транспорту є найбільш суттєвими для міського середовища. Йдеться не лише про прямі викиди від двигунів внутрішнього згоряння, а й про непрямі наслідки функціонування транспортної системи: затримки в русі, перевитрати енергії, шум, погіршення доступності, нераціональне використання вуличного простору

та зростання автомобільної залежності. Такий підхід дає змогу розглядати екологічну проблему ширше, ніж просте порівняння видів пального або типів двигунів.

Друга задача спрямована на аналіз технологічних рішень. До них належать електробуси, трамваї, тролейбуси, гібридні автобуси, системи рекуперації енергії, енергоефективні режими експлуатації та інфраструктура заряджання або енергопостачання. Водночас характеристика технологій має здійснюватися з урахуванням обмежень їх використання. Екологічна перевага транспортного засобу залежить від умов експлуатації, інтенсивності пасажиропотоку, технічного обслуговування, строку служби, вартості інфраструктури та повного життєвого циклу. Тому технологічний аналіз повинен бути пов'язаний з реальними умовами міської транспортної системи.

Третя задача розкриває управлінський і цифровий вимір екологізації. Сучасний пасажирський транспорт не може бути ефективним без якісних даних про попит, швидкість руху, регулярність рейсів, завантаженість транспортних засобів і пересадки. Цифрові інструменти дають змогу виявляти неефективні ділянки маршрутної мережі, коригувати інтервали руху, забезпечувати пріоритет громадського транспорту та підвищувати передбачуваність поїздок для пасажирів. Організаційні рішення, у свою чергу, забезпечують практичне використання цих даних: зміну маршрутів, створення пересадкових вузлів, виділення смуг громадського транспорту, інтеграцію тарифів і розвиток пішохідної та велосипедної доступності.

Четверта задача пов'язана з оцінюванням результатів і практичним упровадженням рішень. Для обґрунтування екологізації недостатньо встановити, що певна технологія є сучасною або має нижчі локальні викиди. Необхідно оцінити, наскільки вона зменшує питомі викиди на одного пасажирів, скорочує енергоспоживання, підвищує якість обслуговування та сприяє переходу населення від приватного автомобіля до громадського або активного транспорту. Саме тому в роботі важливо використовувати показники, які відображають не

лише властивості транспортного засобу, а й ефективність транспортної системи загалом.

Об'єктом дослідження є система пасажирського транспорту міста як складова урбанізованого середовища. До цієї системи належать рухомий склад, маршрутна мережа, зупинки, пересадкові вузли, енергетична та цифрова інфраструктура, організація руху, пасажиропотоки й управлінські рішення, що визначають якість міської мобільності. Об'єкт дослідження розглядається як відкрита система, яка взаємодіє з міським простором, економікою, довкіллям і поведінкою населення. Такий підхід дозволяє враховувати не лише технічні характеристики транспорту, а й умови його використання в реальному міському середовищі.

Предметом дослідження є технології, цифрові інструменти та організаційні рішення, спрямовані на зменшення екологічного впливу пасажирських перевезень у містах. Предмет охоплює способи електрифікації та підвищення енергоефективності рухомого складу, методи оптимізації маршрутної мережі, засоби цифрового моніторингу й управління рухом, підходи до оцінювання питомих викидів та умови підвищення привабливості громадського транспорту для пасажирів. Саме предмет дослідження визначає, які інструменти та рішення аналізуються в роботі, а також за якими критеріями оцінюється їхній екологічний ефект.

Визначені мета, задачі, об'єкт і предмет формують основу подальшого дослідження. Вони дають змогу перейти від загального аналізу літератури до послідовного розгляду екологічних проблем пасажирського транспорту, технологій їх зменшення, ролі цифрового управління та критеріїв оцінювання ефективності. Така логіка забезпечує цілісність роботи й дозволяє розглядати екологізацію пасажирського транспорту як системний процес, що поєднує технічне оновлення, організаційні зміни та орієнтацію на потреби пасажирів.

#### **2.1.4 Методи дослідження**

У цьому розділі подано детальний огляд методів, які можуть бути використані для розв'язання поставлених у роботі задач. Оскільки дослідження

присвячене зменшенню екологічного впливу пасажирського транспорту, методичний апарат має поєднувати екологічні, транспортні, техніко-економічні, цифрові та організаційні підходи. Для кожної з чотирьох задач доцільно застосовувати не один універсальний метод, а групу взаємодоповнювальних методів, що дозволяють перейти від опису проблеми до кількісного оцінювання, порівняння альтернатив і формування практичних рекомендацій.

Методи дослідження згруповано відповідно до чотирьох задач, сформульованих у попередньому розділі. Для кожної задачі наведено п'ять методів. Така структура дає змогу забезпечити логічний зв'язок між метою роботи, дослідницькими задачами та інструментами їх виконання. Перший блок методів спрямований на аналіз екологічних проблем пасажирського транспорту. Другий блок використовується для характеристики технологій зменшення негативного впливу. Третій блок розкриває методи дослідження цифрових та організаційних інструментів. Четвертий блок присвячений оцінюванню ефективності й практичному впровадженню комплексних рішень.

Інвентаризація джерел екологічного впливу є базовим методом для встановлення того, які саме елементи пасажирської транспортної системи формують навантаження на міське середовище. У межах цього методу транспортна система розглядається як сукупність рухомого складу, маршрутів, зупинок, депо, енергетичної інфраструктури, дорожнього простору та організаційних процесів. Для кожного елемента визначаються потенційні види впливу: викиди забруднювальних речовин, парникові гази, шум, споживання енергії, утворення заторів, зайняття міського простору та непрямий вплив через виробництво енергії або технічне обслуговування.

Практичне застосування методу передбачає складання переліку транспортних засобів за типами, віком, видом пального, пасажиромісткістю, середньорічним пробігом і режимами експлуатації. Окремо фіксуються маршрути з найбільшим навантаженням, ділянки регулярних заторів, зони високої концентрації пасажирів і території, де транспорт проходить поблизу житлової забудови, шкіл, лікарень або інших чутливих об'єктів. Така

інвентаризація дає змогу відокремити основні джерела негативного впливу від другорядних і визначити, які з них потребують першочергового аналізу.

Перевагою методу є його системність. Він не обмежується викидами від двигунів, а дозволяє побачити весь спектр проблем, пов'язаних з пасажирськими перевезеннями. Наприклад, маршрут із відносно новими автобусами може залишатися екологічно проблемним через низьку швидкість руху, часті затримки, надмірне дублювання іншими маршрутами або низьку заповненість. Водночас старий рухомий склад може мати критичне значення на маршрутах із високою інтенсивністю руху. Саме інвентаризація створює основу для подальших кількісних розрахунків і порівнянь.

Для практичного використання методу «Інвентаризація джерел екологічного впливу» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку

між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Інвентаризація джерел екологічного впливу» використовується не

ізолювано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Розрахунок викидів є основним кількісним методом оцінювання екологічного впливу пасажирського транспорту. Він дозволяє визначити, скільки забруднювальних речовин і парникових газів утворюється під час експлуатації транспортних засобів. Для автобусів із двигунами внутрішнього згоряння розрахунки можуть виконуватися на основі витрат пального, пробігу, типу двигуна, екологічного стандарту, середньої швидкості руху та режиму експлуатації. Для електротранспорту прямі локальні викиди відсутні, однак можуть враховуватися непрямі викиди, пов'язані з виробництвом електроенергії.

У межах цього методу доцільно розрізнити валові та питомі викиди. Валові викиди показують загальний обсяг забруднення за певний період або на певній території. Питомі викиди дають змогу оцінити екологічну ефективність перевезень у розрахунку на одного пасажирів, один пасажиро-кілометр або один рейс. Саме питомі показники є особливо важливими для порівняння видів пасажирського транспорту, оскільки транспортний засіб із більшими абсолютними викидами може мати кращий результат за умови високої пасажиромісткості та заповненості.

Метод розрахунку викидів дає змогу перевірити, які фактори найбільше впливають на екологічний результат: тип пального, технічний стан, швидкість руху, затори, довжина маршруту, кількість зупинок або завантаженість. Його доцільно застосовувати як для поточного стану системи, так і для сценаріїв модернізації. Наприклад, можна порівняти збереження дизельного парку, часткову заміну на електробуси, розвиток тролейбусної мережі або оптимізацію маршрутів без негайної заміни всього рухомого складу.

Для практичного використання методу «Розрахунок викидів забруднювальних речовин і парникових газів» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів,

транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху.

Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Розрахунок викидів забруднювальних речовин і парникових газів» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Аналіз шумового навантаження використовується для оцінювання акустичного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Шум є важливою екологічною проблемою, оскільки він впливає на комфорт проживання, сон, працездатність і здоров'я населення. На відміну від викидів, шумове забруднення має локальний характер і особливо гостро проявляється вздовж магістральних вулиць, біля зупинок, транспортних вузлів, депо та ділянок інтенсивного гальмування або розгону.

Метод передбачає вимірювання або моделювання рівнів шуму в контрольних точках. Для цього можуть використовуватися дані про інтенсивність руху, типи транспортних засобів, швидкість, дорожнє покриття, рельєф, щільність забудови та відстань до джерела шуму. Окремо аналізується внесок

автобусів, трамваїв, тролейбусів, приватних автомобілів і вантажного транспорту. У межах дослідження важливо встановити, чи є пасажирський транспорт основним джерелом шуму на певній ділянці, чи його вплив формується разом із загальним транспортним потоком.

Перевагою методу є можливість оцінити екологічний ефект не лише через хімічне забруднення, а й через якість міського середовища. Наприклад, електробуси та тролейбуси можуть зменшити шум двигуна, але шум від шин і дорожнього покриття залишатиметься значним за високих швидкостей. Для рейкового транспорту важливими є стан колії, гальмівні системи та конструкція поворотів. Отже, аналіз шумового навантаження дозволяє визначити, які технічні або інфраструктурні заходи потрібні для реального покращення умов проживання населення.

Для практичного використання методу «Аналіз шумового навантаження» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути

поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути

однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз шумового навантаження» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Аналіз заторів та режимів руху дає змогу встановити, як організація транспортного потоку впливає на екологічні показники пасажирського транспорту. У заторах транспортні засоби часто працюють у режимах розгону, гальмування та очікування, що збільшує витрати пального, викиди і тривалість поїздки. Для громадського транспорту затори також знижують регулярність руху, погіршують якість послуги та роблять приватний автомобіль привабливішим для частини пасажирів.

Метод передбачає аналіз середньої швидкості руху, тривалості рейсу, часу простою, інтервалів, відхилень від розкладу, кількості зупинок і затримок на перехрестях. Джерелами даних можуть бути GPS-моніторинг, спостереження, транспортні моделі, дані операторів перевезень або відкриті сервіси руху. Особливо важливо порівнювати плановий і фактичний час руху, оскільки саме різниця між ними показує масштаб організаційних втрат.

Застосування методу дозволяє визначити ділянки, де екологічні проблеми виникають не стільки через тип рухомого складу, скільки через неефективну організацію руху. Якщо автобус із сучасним двигуном постійно затримується в загальному потоці, його екологічні переваги частково втрачаються. Тому аналіз заторів є необхідною основою для обґрунтування виділених смуг, пріоритету на світлофорах, зміни схем руху або коригування маршрутів.

Для практичного використання методу «Аналіз заторів та режимів руху» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів,

шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі

й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктуру та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз заторів та режимів руху» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Просторовий аналіз зон екологічного ризику використовується для визначення територій міста, де вплив пасажирського транспорту є найбільш відчутним для населення. Метод ґрунтується на поєднанні транспортних, екологічних і містобудівних даних. До аналізу можуть включатися маршрути громадського транспорту, інтенсивність руху, концентрація населення, розташування житлової забудови, закладів освіти, медичних установ, зелених зон і ділянок із поганою вентиляцією вуличного простору.

У практичному застосуванні метод дозволяє створити карту проблемних зон. Наприклад, одна ділянка може мати високі викиди через інтенсивний автобусний рух, інша — високий шум через рейковий транспорт, третя — комплексне навантаження через затори, щільну забудову та велику кількість пасажирів. Просторовий аналіз допомагає визначити, де екологічні заходи матимуть найбільший соціальний ефект, оскільки поліпшення умов на таких територіях впливатиме на значну кількість мешканців.

Перевага методу полягає в тому, що він пов'язує транспортну проблему з конкретним міським простором. Це важливо для ухвалення управлінських рішень, оскільки однакові технологічні заходи можуть мати різний результат у різних районах міста. Наприклад, заміна автобусів на електробуси буде особливо доцільною на маршрутах, що проходять через щільну житлову забудову або центральні райони з великою кількістю пішоходів.

Просторовий аналіз дає змогу обґрунтувати пріоритетність таких рішень.

Для практичного використання методу «Просторовий аналіз зон екологічного ризику» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

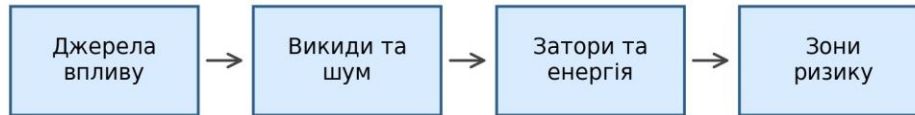
Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть

впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Просторовий аналіз зон екологічного ризику» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

### Логіка аналізу екологічних проблем пасажирського транспорту



Результат: визначення пріоритетних проблем і територій для екологізації

### Рисунок 1. Логіка аналізу екологічних проблем пасажирського транспорту

Джерело рисунка: авторська розробка.

На рисунку показано послідовність аналізу екологічних проблем пасажирського транспорту. Спочатку визначаються джерела впливу, тобто транспортні засоби, маршрути, зупинки, депо та ділянки інтенсивного руху. Далі ці джерела розглядаються через конкретні прояви навантаження: викиди, шум, затори та надмірне споживання енергії. Окремий етап пов'язаний із просторовим визначенням зон ризику, де транспортний вплив найбільше позначається на населенні. Така схема допомагає не змішувати різні типи проблем і послідовно переходити від опису до вимірювання. Вона також показує, що екологічний аналіз має враховувати не лише транспортний засіб, а й умови його руху в місті. Результатом застосування цієї логіки є визначення пріоритетних ділянок і проблем, для яких потрібні першочергові заходи екологізації.

Порівняльний техніко-екологічний аналіз рухомого складу застосовується для зіставлення автобусів, електробусів, трамваїв, тролейбусів, гібридних автобусів та інших видів пасажирського транспорту за сукупністю показників. Метод дозволяє оцінити не лише екологічні переваги, а й технічні умови експлуатації, пасажиромісткість, надійність, потребу в інфраструктурі, енергоспоживання та придатність до конкретних маршрутів.

У межах методу формуються критерії порівняння: локальні викиди, непрямі викиди, рівень шуму, витрати енергії, середня місткість, строк служби, вимоги до обслуговування, вартість інфраструктури та здатність працювати в умовах пікових навантажень. Такий аналіз дає змогу уникнути спрощеного висновку, що певний вид транспорту завжди є кращим. Наприклад, електробус ефективний на одних маршрутах, трамвай — на коридорах із великим пасажиропотоком, а тролейбус — там, де вже існує контактна мережа.

Метод є важливим для обґрунтування технологічних рішень, оскільки він поєднує екологічну та експлуатаційну логіку. Транспортна технологія має бути не тільки екологічно привабливою, а й придатною для стабільної роботи в міській системі. Саме тому порівняльний аналіз повинен враховувати умови маршруту, частоту руху, довжину рейсу, рельєф, кліматичні умови, пасажиропотік і наявну інфраструктуру.

Для практичного використання методу «Порівняльний техніко-екологічний аналіз рухомого складу» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх

оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її

інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Порівняльний техніко-екологічний аналіз рухомого складу» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Аналіз життєвого циклу використовується для оцінювання екологічного впливу транспортної технології не лише під час експлуатації, а й на етапах виробництва, постачання енергії, технічного обслуговування, ремонту та утилізації. Для пасажирського транспорту цей метод особливо важливий, оскільки технології з низькими локальними викидами можуть мати суттєвий екологічний слід на інших етапах життєвого циклу.

Метод передбачає визначення меж аналізу: виробництво транспортного засобу, виробництво та передача енергії, експлуатація, заміна компонентів, обслуговування інфраструктури й завершення строку служби. Для електробусів особливо важливими є акумулятори, їх ресурс, можливість повторного використання та утилізації. Для трамваїв і тролейбусів значну роль відіграє інфраструктура. Для дизельних автобусів ключовими залишаються витрати пального та прямі викиди.

Перевага методу полягає в тому, що він дозволяє уникнути перенесення екологічної проблеми з одного етапу на інший. Якщо в місті відсутні вихлопні гази від електробуса, це ще не означає повної екологічної нейтральності технології. Аналіз життєвого циклу допомагає оцінити повний екологічний результат і визначити, за яких умов технологія дійсно зменшує загальне навантаження на довкілля.

Для практичного використання методу «Аналіз життєвого циклу транспортних рішень» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому

етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива,

оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз життєвого циклу транспортних рішень» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Енергетичний аналіз спрямований на визначення кількості енергії, необхідної для виконання пасажирських перевезень. Він дозволяє порівнювати транспортні технології за витратами енергії на кілометр пробігу, рейс, пасажир або пасажиро-кілометр. Для екологізації транспорту цей метод має принципове значення, оскільки зменшення викидів часто пов'язане не тільки з видом пального, а й із підвищенням енергоефективності системи.

У межах методу враховуються маса транспортного засобу, пасажиромісткість, середня швидкість, кількість зупинок, рельєф маршруту, режим водіння, робота систем опалення або кондиціонування, можливість рекуперації енергії та втрати в енергетичній інфраструктурі. Для електротранспорту аналізується споживання електроенергії та режим

заряджання. Для дизельного або гібридного транспорту — витрати пального в різних режимах руху.

Метод дозволяє виявити резерви зменшення енергоспоживання без обов'язкової повної заміни рухомого складу. Наприклад, екологічний результат може бути досягнутий через оптимізацію графіків, зменшення холостого пробігу, поліпшення стилю керування, використання рекуперації або підвищення завантаженості транспорту. Таким чином, енергетичний аналіз поєднує технічні й організаційні рішення.

Для практичного використання методу «Енергетичний аналіз транспортних технологій» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою.

Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Енергетичний аналіз транспортних технологій» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний

результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Оцінювання інфраструктурної готовності застосовується для визначення того, чи здатне місто впровадити певну екологічну транспортну технологію. Навіть найефективніший рухомий склад не забезпечить очікуваного результату без відповідної інфраструктури: зарядних станцій, тягових підстанцій, контактної мережі, депо, ремонтної бази, енергетичних потужностей і кваліфікованого персоналу.

Метод передбачає аналіз наявної інфраструктури та її відповідності потребам нової технології. Для електробусів оцінюються місця заряджання, потужність електромережі, тривалість зарядки, графіки роботи, резервний парк і можливість експлуатації в зимовий період. Для трамваїв і тролейбусів враховується стан колій, контактної мережі, підстанцій і ремонтних служб. Також важливо оцінити, чи не створить нова технологія додаткових обмежень для маршрутної мережі.

Перевагою методу є його практична спрямованість. Він дозволяє відокремити технології, які можна впроваджувати швидко, від тих, що потребують тривалої підготовки та значних інвестицій. Оцінювання інфраструктурної готовності допомагає сформуванню реалістичний план модернізації та уникнути ситуації, коли закуплений рухомий склад не може ефективно використовуватися через нестачу інфраструктури.

Для практичного використання методу «Оцінювання інфраструктурної готовності» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду

спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Оцінювання інфраструктурної готовності» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Сценарне моделювання використовується для порівняння різних варіантів розвитку пасажирського транспорту. Метод дозволяє оцінити, як зміняться екологічні, енергетичні та експлуатаційні показники за різних сценаріїв: збереження наявного парку, часткова електрифікація, розвиток трамвайної мережі, оновлення автобусів, впровадження гібридних технологій або комбінований підхід.

Для кожного сценарію визначаються вихідні припущення: кількість транспортних засобів, маршрути, обсяг перевезень, витрати енергії, викиди, інвестиції, строки впровадження та очікувана якість послуги. Далі сценарії порівнюються за екологічними й практичними критеріями. Це дає змогу оцінити не тільки кінцевий результат, а й перехідний період, протягом якого місто поступово оновлює систему.

Сценарне моделювання є корисним для прийняття рішень в умовах невизначеності. Воно дозволяє врахувати різні фінансові можливості, темпи оновлення парку, зміни пасажиропотоків і розвиток енергетики. У результаті

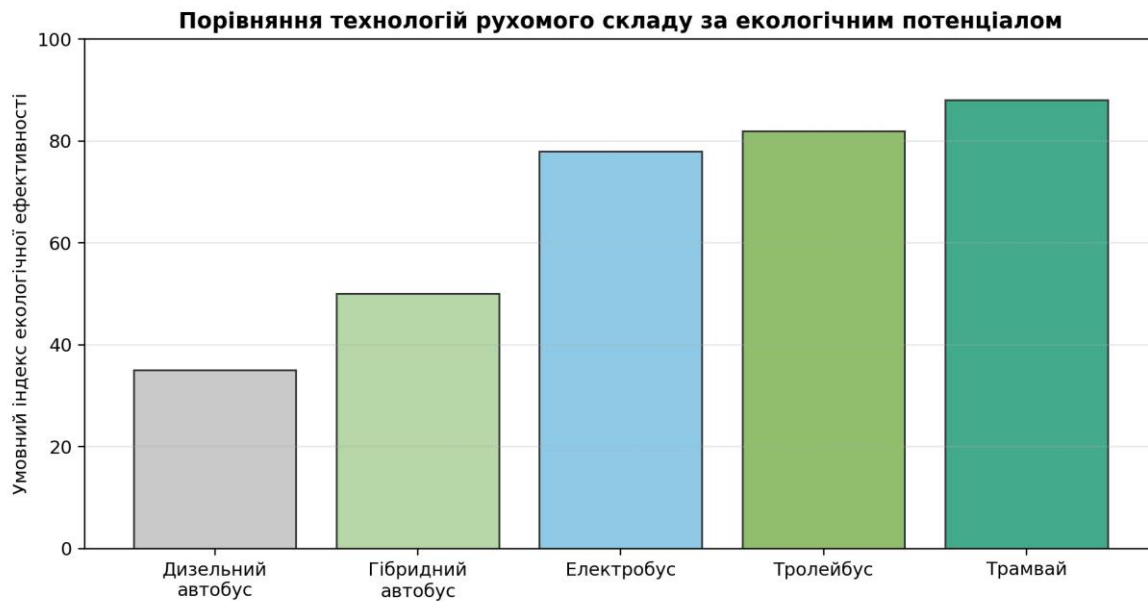
можна обґрунтувати не один абстрактно найкращий варіант, а послідовність дій, яка є реалістичною для конкретного міста.

Для практичного використання методу «Сценарне моделювання технологічної модернізації» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Сценарне моделювання технологічної модернізації» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.



**Рисунок 2.** Порівняння технологій рухомого складу за екологічним потенціалом  
Джерело рисунка: авторська розробка.

Рисунок ілюструє умовне порівняння різних технологій рухомого складу за їх екологічним потенціалом. Найнижчий результат має дизельний автобус, оскільки його експлуатація супроводжується прямими локальними викидами та залежністю від викопного пального. Гібридний автобус демонструє кращі показники завдяки зменшенню витрат пального в міському циклі, але не усуває проблему повністю. Електробус, тролейбус і трамвай мають вищий потенціал через відсутність локальних вихлопних газів і можливість використання електроенергії. Водночас рисунок не означає, що одна технологія автоматично є найкращою для всіх умов. Остаточний вибір залежить від пасажиропотоку, маршруту, інфраструктури, вартості впровадження та джерел енергії. Саме тому порівняльний аналіз має поєднувати екологічні, технічні й організаційні критерії. Аналіз даних GPS-моніторингу дозволяє оцінити фактичну роботу громадського транспорту: швидкість, регулярність, відхилення від розкладу, час простою, тривалість рейсів і стабільність інтервалів. Цей метод є особливо важливим, оскільки екологічна ефективність залежить не тільки від типу транспортного засобу, а й від того, як він реально рухається в міському потоці.

Дані GPS дають змогу визначити ділянки, де транспорт систематично затримується, втрачає швидкість або порушує графік. Такі ділянки можуть бути пріоритетними для виділених смуг, зміни світлофорного регулювання або коригування розкладу. Метод також дозволяє порівнювати маршрути між собою та виявляти неефективні рейси, дублювання або надмірні простой.

Екологічна цінність методу полягає в тому, що він допомагає зменшити витрати енергії та викиди через поліпшення організації руху. Якщо транспорт рухається рівномірніше, менше простоює і точніше дотримується графіка, зростає його привабливість для пасажирів. Це може зменшити частку поїздок приватними автомобілями й посилити системний екологічний ефект.

Для практичного використання методу «Аналіз даних GPS-моніторингу» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових

спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз даних GPS-моніторингу» використовується не ізольовано, а як

частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Аналіз пасажиропотоків використовується для визначення фактичного попиту на перевезення в різні години доби, дні тижня та на різних ділянках маршрутної мережі. Метод дозволяє зіставити транспортну пропозицію з реальними потребами населення. Якщо транспорт працює з низькою заповненістю, питомі викиди та енерговитрати на одного пасажирів зростають. Якщо ж транспорт перевантажений, погіршується якість послуги й частина пасажирів може переходити на приватні автомобілі.

Джерелами даних можуть бути електронний квиток, автоматизовані лічильники пасажирів, ручні обстеження, мобільні дані або опитування. У межах методу визначаються пікові напрямки, слабко завантажені рейси, нерівномірність попиту, потреба в пересадках і відповідність місткості рухомого складу фактичному пасажиропотоку.

Метод має важливе значення для екологізації, оскільки дозволяє підвищити ефективність використання транспортних засобів. Оптимізація інтервалів, вибір відповідної місткості, зміна маршрутів і посилення найбільш затребуваних напрямків зменшують питомі екологічні витрати перевезень. Таким чином, аналіз пасажиропотоків є основою для раціональної маршрутної політики.

Для практичного використання методу «Аналіз пасажиропотоків» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення

базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз пасажиропотоків» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Моделювання маршрутної мережі застосовується для оцінювання того, як зміна маршрутів, пересадок, інтервалів і транспортних коридорів впливає на доступність, тривалість поїздок, завантаженість і екологічні показники. Метод

дозволяє перевірити різні варіанти організації системи до їх фактичного впровадження.

У межах моделювання місто подається як мережа вузлів і зв'язків. Вузлами можуть бути зупинки, пересадкові пункти, станції або райони формування попиту. Зв'язками є маршрути громадського транспорту, пішохідні підходи та інші способи пересування. Модель дозволяє оцінити, як пасажери розподіляються між маршрутами, де виникають перевантаження, які пересадки є незручними і які зміни можуть скоротити загальну тривалість поїздок.

Екологічна перевага методу полягає в тому, що він дає змогу зменшити зайву транспортну роботу. Раціональніша мережа може забезпечити той самий або кращий рівень доступності з меншою кількістю дублюючих рейсів, нижчими витратами енергії та меншим навантаженням на вулиці. Моделювання також допомагає оцінити, чи здатні зміни в мережі залучити пасажирів із приватних автомобілів.

Для практичного використання методу «Моделювання маршрутної мережі» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Моделювання маршрутної мережі» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Оцінювання ефективності пріоритету громадського транспорту застосовується для аналізу таких заходів, як виділені смуги, пріоритет на світлофорах, окремі фази руху, заборона паркування на маршрутах громадського транспорту та спеціальна організація зупинок. Метод дозволяє визначити, чи скорочують ці заходи час руху, затримки, нерегулярність і витрати енергії.

Для оцінювання порівнюються показники до та після впровадження заходів або моделюються можливі зміни. Аналізуються середня швидкість, стабільність

інтервалів, тривалість рейсу, кількість транспортних засобів, необхідних для підтримання графіка, витрати пального або електроенергії та зміни пасажиропотоку. Якщо громадський транспорт стає швидшим і надійнішим, він отримує перевагу над приватним автомобілем.

Метод важливий тим, що показує організаційний шлях до екологізації без обов'язкової негайної заміни всього рухомого складу. Навіть наявні автобуси можуть працювати екологічніше, якщо вони менше простоюють і рухаються рівномірніше. Пріоритет громадського транспорту також підвищує якість послуги, що є ключовою умовою зміни транспортної поведінки населення.

Для практичного використання методу «Оцінювання ефективності пріоритету громадського транспорту» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але

не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктуру та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Оцінювання ефективності пріоритету громадського транспорту» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Оцінювання інтегрованості транспортних сервісів спрямоване на визначення того, наскільки зручно пасажирові використовувати громадський транспорт у поєднанні з пішохідними маршрутами, велосипедною інфраструктурою, пересадками, електронною оплатою та цифровими інформаційними сервісами. Метод дозволяє оцінити транспортну систему не як набір окремих маршрутів, а як єдиний сервіс мобільності.

До критеріїв інтегрованості належать зручність пересадок, узгодженість розкладів, єдина тарифна система, наявність інформації в реальному часі, доступність зупинок, можливість планування поїздки та якість зв'язків між різними видами транспорту. Чим вищою є інтегрованість, тим легше пасажирові відмовитися від приватного автомобіля в щоденних поїздках.

Екологічний ефект інтегрованості полягає в тому, що вона збільшує привабливість сталих видів мобільності. Якщо громадський транспорт, пішохідні маршрути, велосипедна інфраструктура та цифрові сервіси працюють узгоджено, система стає більш конкурентною порівняно з автомобілем. Отже, метод оцінювання інтегрованості допомагає визначити організаційні умови для зменшення транспортного навантаження на місто.

Для практичного використання методу «Оцінювання інтегрованості транспортних сервісів» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть

впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Оцінювання інтегрованості транспортних сервісів» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.



**Рисунок 3.** Використання цифрових даних для екологізації перевезень

Джерело рисунка: авторська розробка.

На рисунку відображено роль цифрових даних у прийнятті транспортних рішень. GPSмоніторинг дає інформацію про фактичний рух транспортних засобів, швидкість, затримки та регулярність. Електронний квиток і дані

пасажиропотоків дозволяють зрозуміти, де і коли формується найбільший попит на перевезення. Об'єднання цих даних створює основу для моделювання маршрутної мережі та оцінювання її слабких місць. Після цього модель може бути використана для ухвалення управлінських рішень: зміни інтервалів,

посилення маршрутів, створення пересадкових вузлів або запровадження пріоритету громадського транспорту. Важливо, що цифрові дані самі по собі не зменшують екологічний вплив. Їх ефективність проявляється лише тоді, коли вони перетворюються на практичні дії, що скорочують затримки, зменшують зайвий пробіг і підвищують привабливість громадського транспорту.

Багатокритеріальне оцінювання використовується тоді, коли транспортні рішення потрібно порівнювати за кількома показниками одночасно. Для екологізації пасажирського транспорту одного критерію недостатньо, оскільки рішення може мати низькі викиди, але бути дорогим, складним у впровадженні або незручним для пасажирів. Тому метод передбачає одночасне врахування екологічних, технічних, економічних, соціальних і організаційних критеріїв.

У межах методу формується система показників: питомі викиди, енергоефективність, вартість впровадження, експлуатаційні витрати, пасажиромісткість, надійність, доступність, вплив на затори, рівень шуму та потреба в інфраструктурі. Кожному критерію може надаватися вага залежно від пріоритетів міста. Після цього альтернативи порівнюються між собою, що дозволяє обґрунтувати найбільш збалансоване рішення.

Перевага методу полягає в прозорості. Він дозволяє пояснити, чому певне рішення є доцільним, навіть якщо воно не є найкращим за одним окремим показником. Наприклад, трамвай може вимагати значних інвестицій, але мати високу провізну здатність і довгостроковий екологічний ефект. Електробус може бути гнучкішим, але залежати від зарядної інфраструктури. Багатокритеріальне оцінювання допомагає порівнювати такі альтернативи коректно.

Для практичного використання методу «Багатокритеріальне оцінювання транспортних рішень» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати

конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження,

неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Багатокритеріальне оцінювання транспортних рішень» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Розрахунок питомих екологічних показників є ключовим методом для оцінювання фактичної ефективності пасажирських перевезень. На відміну від валових показників, питомі показники враховують обсяг транспортної роботи та кількість перевезених пасажирів. Найважливішими є викиди на одного пасажирів, викиди на пасажиро-кілометр, енерговитрати на пасажиро-кілометр і рівень шумового впливу на одиницю транспортної роботи.

Метод дозволяє уникнути помилкових висновків. Наприклад, транспортний засіб із великими абсолютними витратами енергії може бути ефективним, якщо перевозить багато пасажирів. І навпаки, малий транспортний засіб із низькими абсолютними викидами може мати високі питомі показники за низької

заповненості. Тому оцінювання повинно враховувати не лише характеристики рухомого складу, а й фактичне використання системи.

Практичне значення методу полягає в можливості порівнювати маршрути, види транспорту та сценарії модернізації за єдиною логікою. Він допомагає визначити, де потрібно збільшити завантаженість, змінити інтервали, застосувати транспорт більшої місткості або оптимізувати маршрут. Питомі показники є основою для обґрунтування пріоритетів екологізації.

Для практичного використання методу «Розрахунок питомих екологічних показників» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть

впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Розрахунок питомих екологічних показників» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Аналіз витрат і вигід використовується для оцінювання економічної доцільності екологічних транспортних рішень. Метод дозволяє зіставити витрати на закупівлю рухомого складу, інфраструктуру, обслуговування, енергію та управління з очікуваними вигодами: скороченням викидів, зменшенням шуму, економією енергії, підвищенням якості послуг, скороченням часу поїздок і покращенням здоров'я населення.

У межах методу важливо враховувати як прямі, так і непрямі вигоди. Прямими є зменшення витрат на паливо або енергію, зниження витрат на обслуговування, підвищення надійності. Непрямими є екологічні та соціальні ефекти: чистіше повітря, менше шуму, менше заторів, вища привабливість громадського транспорту. Частина таких вигід складно виражається у грошовій формі, але їх потрібно враховувати під час прийняття рішень.

Метод дає змогу визначити, чи є певне рішення виправданим у довгостроковій перспективі. Наприклад, початкові витрати на електротранспорт можуть бути вищими, але експлуатаційні витрати та екологічні вигоди можуть компенсувати різницю протягом строку служби. Аналіз витрат і вигід допомагає обґрунтувати не лише екологічну, а й економічну логіку впровадження.

Для практичного використання методу «Аналіз витрат і вигід» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без

такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід

також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Аналіз витрат і вигід» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Моніторинг результатів впровадження є методом, який дозволяє оцінити фактичний ефект після реалізації транспортних заходів. Він необхідний тому, що прогнозовані результати не завжди збігаються з реальними. Причинами можуть бути зміни пасажиропотоків, поведінки населення, умов руху, вартості енергії, технічного стану транспорту або якості управління.

Метод передбачає регулярний збір даних до та після впровадження рішення. Аналізуються викиди, енергоспоживання, швидкість руху, регулярність, пасажиропотік, скарги пасажирів, рівень шуму, завантаженість і витрати. Важливо встановити базовий рівень, з яким порівнюватимуться результати. Без такого базового рівня складно визначити, чи справді захід дав екологічний ефект.

Моніторинг має не лише контрольне, а й управлінське значення. Якщо результати не відповідають очікуванням, місто може коригувати маршрути, графіки, режими заряджання, пріоритети руху або інформаційні сервіси. Таким чином, екологізація розглядається як безперервний процес удосконалення, а не як одноразова закупівля нової техніки.

Для практичного використання методу «Моніторинг результатів впровадження» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна

перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу, впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від

поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути односторонніх висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Моніторинг результатів упровадження» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

Формування інтегрованих рекомендацій є завершальним методом, який узагальнює результати попередніх етапів дослідження. Його мета полягає в тому, щоб перетворити аналітичні висновки на практичні пропозиції для міської транспортної політики. Рекомендації повинні враховувати технічні можливості, екологічні пріоритети, фінансові обмеження, потреби пасажирів і організаційну спроможність міста.

Метод передбачає групування заходів за строками реалізації: короткострокові, середньострокові та довгострокові. До короткострокових можуть належати оптимізація розкладів, GPS-контроль, пріоритет на перехрестях і покращення інформації для пасажирів. До середньострокових — оновлення частини рухомого складу, створення пересадкових вузлів, розвиток електронного квитка. До довгострокових — електрифікація маршрутів, розвиток трамвайної або тролейбусної інфраструктури, зміна просторової логіки міської мобільності.

Інтегровані рекомендації мають бути не набором окремих заходів, а узгодженою програмою дій. Це означає, що технічні рішення повинні підтримуватися цифровими інструментами, організаційними змінами та оцінюванням результатів. Саме такий підхід дозволяє забезпечити стійке зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту й одночасно підвищити якість транспортного обслуговування населення.

Для практичного використання методу «Формування інтегрованих рекомендацій» необхідно спочатку визначити межі аналізу, перелік потрібних даних і очікуваний результат. Межі аналізу мають відповідати конкретній задачі дослідження: маршрут, група маршрутів, транспортний вузол, вид рухомого складу або вся міська система пасажирських перевезень. На цьому етапі важливо не обмежуватися загальними твердженнями, а зафіксувати показники, які можна перевірити: час руху, пробіг, пасажиропотік, витрати енергії, рівень викидів, шумове навантаження, інтервали руху або доступність пересадок. Якщо дані мають різне походження, їх потрібно привести до єдиного періоду спостереження та однакових одиниць вимірювання. Це дозволяє уникнути ситуації, коли висновки робляться на основі несумісних або випадкових показників. Підготовчий етап також передбачає встановлення базового стану, з яким надалі порівнюватимуться альтернативні рішення. Без такого базового стану неможливо довести, що запропонований захід справді зменшує екологічний вплив.

Наступним кроком є побудова логіки застосування методу до конкретної транспортної задачі. Для цього визначаються вхідні параметри, порядок їх оброблення та форма представлення результату. Наприклад, результат може бути поданий у вигляді таблиці, карти, діаграми, матриці порівняння або текстового висновку з кількісними показниками. Особливу увагу потрібно приділити зв'язку між методом і управлінським рішенням. Якщо метод лише описує проблему, але не показує, які дії можуть її зменшити, його практична цінність буде обмеженою. Тому під час застосування методу слід одразу визначати, які рішення можуть впливати з отриманих результатів: зміна маршруту, оновлення рухомого складу,

впровадження пріоритету громадського транспорту, розвиток зарядної інфраструктури або коригування інтервалів руху. Саме такий зв'язок перетворює метод з аналітичного інструмента на основу для екологічної модернізації.

Важливою умовою є перевірка достовірності результатів. Для цього доцільно зіставляти дані з кількох джерел: операторів перевезень, польових спостережень, GPSмоніторингу, електронного квитка, статистики енергоспоживання або екологічних розрахунків. Якщо різні джерела показують близькі результати, висновки можна вважати більш надійними. Якщо між ними є суттєві розбіжності, потрібно пояснити причину: різні періоди спостереження, неповні дані, сезонні коливання, аварійні ситуації або зміни в організації руху. Для дослідження пасажирського транспорту така перевірка особливо важлива, оскільки транспортна система змінюється протягом доби й залежить від поведінки пасажирів. Метод має враховувати пікові та міжпікові періоди, робочі й вихідні дні, а також можливі зміни попиту після впровадження заходів. Це підвищує обґрунтованість висновків і зменшує ризик помилкових рекомендацій.

Завершальним етапом застосування методу є інтерпретація результатів з позиції екологічної ефективності. Отримані показники потрібно пов'язувати з головною метою роботи — зменшенням негативного впливу пасажирського транспорту на міське середовище. Якщо метод показує зменшення викидів, слід також оцінити, чи не погіршується якість транспортного обслуговування. Якщо метод демонструє скорочення часу руху, потрібно визначити, чи призводить це до економії енергії та підвищення привабливості громадського транспорту. Якщо метод виявляє перевагу певної технології, необхідно перевірити її інфраструктурну та фінансову реалістичність. Такий підхід дозволяє уникнути однобічних висновків і забезпечує комплексне бачення проблеми. У результаті метод «Формування інтегрованих рекомендацій» використовується не ізольовано, а як частина загальної системи дослідження, де кожен аналітичний результат має бути пов'язаний з практичним рішенням і очікуваним екологічним ефектом.

**Матриця багатокритеріального оцінювання рішень**

	Екологія	Економіка	Якість послуги	Інфраструктура
Сценарій А	4	3	3	5
Сценарій В	5	2	4	3
Сценарій С	3	5	4	4

1 — низька відповідність, 5 — висока відповідність критерію

**Рисунок 4.** Матриця багатокритеріального оцінювання транспортних рішень

Джерело рисунка: авторська розробка.

Рисунок демонструє принцип багатокритеріального оцінювання транспортних рішень. Кожен сценарій розглядається не за одним показником, а за кількома критеріями одночасно. До таких критеріїв належать екологічний результат, економічна доцільність, якість транспортної послуги та інфраструктурна готовність. Матриця дозволяє побачити, що рішення з високою екологічною оцінкою може мати слабкі сторони за вартістю або складністю впровадження. Навпаки, дешевший сценарій може бути менш ефективним з погляду скорочення викидів. Такий підхід робить процес вибору прозорішим і дає можливість пояснити управлінське рішення. Для екологізації пасажирського транспорту це особливо важливо, оскільки практичні рішення завжди мають балансувати між довкіллям, фінансами, якістю послуг і технічними можливостями міста.

Узагальнюючи розглянуті методи, можна зазначити, що виконання поставлених задач потребує комплексного дослідницького підходу. Інвентаризація, розрахунок викидів, аналіз шуму, просторовий аналіз, життєвий цикл, енергетичні розрахунки, цифрові дані, моделювання маршрутів, багатокритеріальне оцінювання та моніторинг результатів доповнюють одне

одного. Разом вони дають змогу не лише описати проблему, а й визначити практичні умови, за яких технології екологізації пасажирського транспорту можуть забезпечити реальне покращення міського середовища.

### **2.1.5 Проведення дослідів**

На основі огляду методів доцільно перейти від теоретичного опису методичного апарату до його практичного застосування. Оскільки робота має узагальнювальний характер і не спирається на повну базу фактичних даних конкретного міста, досліді виконано як розрахунково-аналітичні приклади. Вони демонструють, як обрані методи можуть бути використані для розв'язання поставлених задач, які показники потрібно враховувати та які висновки можна отримати для прийняття транспортних рішень.

Детальний огляд методів показав, що для дослідження екологізації пасажирського транспорту недостатньо застосовувати лише один показник або один метод. Найбільш результативним є поєднання кількісних розрахунків, просторового аналізу, порівняння технологій, цифрових даних і багатокритеріального оцінювання. Методи інвентаризації, розрахунку викидів, аналізу шуму, оцінювання життєвого циклу, аналізу GPS-даних і багатокритеріального вибору не дублюють один одного, а розкривають різні сторони проблеми. Саме тому для кожної задачі необхідно обрати такий метод, який найкраще відповідає її змісту, але водночас може бути пов'язаний з іншими методами в єдину систему дослідження.

Вибір кращих методів для поставлених задач. Для першої задачі, пов'язаної з аналізом екологічних проблем, найкращим є метод розрахунку викидів забруднювальних речовин і парникових газів, оскільки він дає кількісний результат і дозволяє порівнювати варіанти. Для другої задачі, що стосується технологій екологізації, доцільно обрати порівняльний техніко-екологічний аналіз рухомого складу, оскільки він враховує не лише викиди, а й енергоефективність, місткість та експлуатаційні умови. Для третьої задачі найдоцільнішим є аналіз даних GPS-моніторингу, тому що саме він показує фактичну роботу транспортної системи, затримки, швидкість і регулярність. Для

четвертої задачі оптимальним є багатокритеріальне оцінювання транспортних рішень, оскільки воно дозволяє зіставити екологічні, економічні, сервісні та інфраструктурні критерії.

**Таблиця 1.** Обрані методи для проведення дослідів

Задача	Обраний метод	Аргументація вибору
Задача 1	Розрахунок викидів	Дає кількісну оцінку екологічного навантаження та дозволяє порівнювати поточний і модернізований стан.
Задача 2	Порівняльний техніко-екологічний аналіз	Дозволяє зіставити різні види рухомого складу за екологічними та експлуатаційними параметрами.
Задача 3	Аналіз GPS-моніторингу	Виявляє фактичні затримки, нерівномірність руху та ділянки, де організаційні рішення можуть зменшити витрати енергії.
Задача 4	Багатокритеріальне оцінювання	Дає змогу обрати найзбалансованіший сценарій з урахуванням екології, вартості, якості послуги та інфраструктури.

Дослід 1. Розрахунок викидів для задачі аналізу екологічних проблем.

Для першого досліді прийнято умовний міський автобусний маршрут, на якому протягом доби виконується 120 рейсів. Довжина одного рейсу становить 12 км, тобто добовий пробіг рухомого складу на маршруті дорівнює 1440 км. Для дизельного автобуса прийнято середню витрату пального 32 л на 100 км, а питомий викид вуглекислого газу — 2,64 кг CO<sub>2</sub> на 1 л дизельного пального. Для електробуса прямі локальні викиди на маршруті приймаються рівними нулю, але для коректності враховано непрямі викиди від виробництва електроенергії. Прийнято споживання електробуса 1,25 кВт·год/км і умовний коефіцієнт 0,35 кг CO<sub>2</sub> на 1 кВт·год.

**Таблиця 2.** Результати розрахунку добових викидів CO<sub>2</sub> для умовного маршруту

Варіант	Пробіг	Розрахунковий показник	CO <sub>2</sub> , кг/добу
Дизельний автобус	1440	32 л/100 км; 2,64 кг CO <sub>2</sub> /л	1216,5
Електробус	1440	1,25 кВт·год/км; 0,35 кг CO <sub>2</sub> /кВт·год	630,0

Результат досліджує, що перехід з дизельного автобуса на електробус у заданих умовах може скоротити розрахункові добові викиди CO<sub>2</sub> приблизно на 586,5 кг, тобто майже на 48,2%. Якщо враховувати лише локальні міські викиди, ефект буде ще більшим, оскільки електробус не створює вихлопних газів безпосередньо на маршруті. Однак повне екологічне оцінювання має враховувати джерела електроенергії, режим заряджання та строк служби акумуляторів. Дослід підтверджує, що метод розрахунку викидів є доцільним для першої задачі, оскільки дає зрозумілий кількісний результат. Він також дозволяє порівнювати сценарії модернізації та визначати очікуваний екологічний ефект ще до впровадження заходів.

Дослід 2. Порівняльний техніко-екологічний аналіз для задачі вибору технологій.

Для другої задачі порівняно п'ять варіантів рухомого складу: дизельний автобус, гібридний автобус, електробус, тролейбус і трамвай. Оцінювання виконано за п'ятибальною шкалою, де 1 означає низьку відповідність критерію, а 5 — високу відповідність. Критеріями обрано локальні викиди, енергоефективність, пасажиромісткість, потребу в новій інфраструктурі та гнучкість використання на маршрутах. Такий підхід дозволяє врахувати, що найекологічніший транспортний засіб не завжди є найпростішим або найдешевшим для впровадження.

**Таблиця 3.** Порівняльна оцінка технологій рухомого складу

Технологія	Викиди	Енергія	Містк.	Інфр.	Гнучк.	Сума
Дизельний автобус	2	2	3	5	5	17
Гібридний автобус	3	3	3	5	5	19
Електробус	5	4	3	3	4	19
Тролейбус	5	4	4	2	3	18
Трамвай	5	5	5	1	2	18

За сумарною оцінкою найкращими в умовному прикладі виявилися гібридний автобус та електробус, які набрали по 19 балів. Проте зміст цих результатів різний: гібридний автобус виграє завдяки простоті впровадження, а електробус — завдяки вищому екологічному ефекту. Тролейбус і трамвай мають сильні екологічні переваги, але потребують складнішої інфраструктури, тому їх доцільно розглядати для стабільних коридорів із великим пасажиропотоком. Дизельний автобус має високу гнучкість, але поступається за екологічними критеріями. Отже, дослід показує, що вибір технології має залежати від умов маршруту, а не лише від загальної екологічної характеристики транспорту.

Дослід 3. Аналіз GPS-моніторингу для задачі цифрового управління.

Для третього дослідження використано умовні дані GPS-моніторингу маршруту в ранковий піковий період. Планова тривалість рейсу становить 42 хв, але фактичний час руху змінюється залежно від ділянки маршруту. Маршрут поділено на п'ять ділянок, для кожної з яких визначено плановий час, фактичний час і затримку. Такий аналіз дозволяє встановити, де саме виникають втрати часу і які ділянки мають найбільший потенціал для організаційних заходів.

**Таблиця 4.** Умовні результати аналізу GPS-моніторингу маршруту

Ділянка маршруту	План, хв	Факт, хв	Затримка
Житловий район — магістраль	8	10	2
Магістральний коридор	10	17	7
Центральна частина міста	9	15	6
Пересадковий вузол	7	9	2
Кінцева ділянка	8	8	0
Разом	42	59	17

Дослід показує, що найбільші затримки виникають на магістральному коридорі та в центральній частині міста. Саме ці ділянки мають бути пріоритетними для впровадження виділених смуг, адаптивного світлофорного регулювання або обмеження хаотичного паркування. Затримка 17 хв на одному рейсі означає не лише погіршення якості послуги, а й додаткові витрати енергії, нерівномірність інтервалів і потребу в більшій кількості транспортних засобів для підтримання графіка. Якщо скоротити затримки хоча б на половину, маршрут стане швидшим і привабливішим для пасажирів. Це може зменшити частку поїздок приватними автомобілями, що має системний екологічний ефект. Отже, GPS-аналіз є найкращим методом для третьої задачі, оскільки показує реальні проблеми руху, а не лише планові характеристики маршруту.

Дослід 4. Багатокритеріальне оцінювання для вибору комплексного рішення.

Для четвертої задачі порівняно три сценарії екологізації пасажирського транспорту. Сценарій А передбачає часткову заміну дизельних автобусів на електробуси. Сценарій В передбачає впровадження пріоритету громадського транспорту без значної заміни рухомого складу. Сценарій С передбачає комплексний підхід: часткову електрифікацію, GPSконтроль, оптимізацію маршрутів і пріоритет на найбільш проблемних ділянках. Критеріями оцінювання є екологічний ефект, вартість, швидкість упровадження, якість послуги та інфраструктурна реалістичність.

**Таблиця 5.** Багатокритеріальне оцінювання сценаріїв екологізації

Сценарій	Екол.	Варт.	Швидк.	Якість	Реал.	Сума
А: електробуси	5	2	3	4	3	17
В: пріоритет руху	3	5	5	4	5	22
С: комплексний підхід	5	4	4	5	4	22

Результати показують, що сценарії В і С мають однакову сумарну оцінку, але відрізняються за змістом. Сценарій В є швидким і дешевшим, тому може бути першим етапом екологізації. Сценарій С має вищу якість і сильніший системний екологічний ефект, оскільки поєднує технічні, цифрові та організаційні заходи. Сценарій А має високий екологічний потенціал, але програє через вартість і потребу в інфраструктурі. Найкращим рішенням для практичного впровадження є поетапна комбінація сценаріїв В і С: спочатку пріоритет громадського транспорту та цифровий контроль, далі — поступова електрифікація найбільш завантажених маршрутів. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки дає швидкий ефект і водночас створює основу для довгострокового зменшення екологічного впливу.

Загальні висновки за результатами дослідів. Проведені розрахунково-аналітичні дослідження підтверджують, що екологізація пасажирського транспорту має здійснюватися не одним заходом, а поєднанням кількох рішень. Розрахунок викидів показує кількісний екологічний ефект від зміни типу рухомого складу. Порівняльний аналіз технологій доводить, що вибір транспорту залежить від умов маршруту та інфраструктури. GPS-моніторинг показує, що значна частина екологічних втрат виникає через затримки й неефективну організацію руху. Багатокритеріальне оцінювання дозволяє обрати не просто найекологічніший, а найбільш збалансований сценарій. У підсумку найбільш доцільним є комплексний підхід, який поєднує пріоритет громадського транспорту, цифровий моніторинг, оптимізацію маршрутів і поступове впровадження електрифікованого рухомого складу.

### 2.1.6 Обговорення результатів

Проведене дослідження дозволяє узагальнити результати попередніх розділів і визначити їх значення для вирішення проблеми зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту в міському середовищі. У роботі послідовно розглянуто актуальність теми, стан наукової розробленості проблеми, мету і задачі дослідження, методичний апарат та приклади застосування обраних методів. Така логіка дала змогу перейти від загального опису проблеми до конкретних розрахунково-аналітичних дослідів, які показують, як саме можуть оцінюватися екологічні наслідки транспортних рішень.

Основний результат полягає в тому, що екологізація пасажирського транспорту не може розглядатися як проста заміна одного виду рухомого складу іншим. Розрахунки показали, що електрифікація здатна суттєво зменшити викиди CO<sub>2</sub> і практично усунути локальні вихлопні гази на маршруті, однак цей ефект залежить від джерел електроенергії, режиму експлуатації, завантаженості транспортного засобу та організації руху. Тому технічна модернізація повинна поєднуватися з цифровим моніторингом, оптимізацією маршрутів, пріоритетом громадського транспорту та підвищенням якості послуги для пасажирів.

Результати першого дослідження підтвердили, що метод розрахунку викидів є ефективним інструментом для кількісного порівняння транспортних сценаріїв. Умовний приклад із заміною дизельного автобуса на електробус показав скорочення добових викидів CO<sub>2</sub> майже на половину за умови врахування непрямих викидів від виробництва електроенергії. Це свідчить про значний потенціал електрифікації, але водночас підкреслює необхідність коректного обліку повного енергетичного ланцюга. Якщо аналізувати лише локальні викиди, електробус виглядає майже безальтернативним рішенням. Якщо ж враховувати повний екологічний слід, оцінювання стає складнішим і потребує системного підходу.

Другий дослід засвідчив, що порівняння технологій рухомого складу має здійснюватися не тільки за екологічними показниками, а й за експлуатаційною придатністю. Електробус, троллейбус і трамвай мають високий екологічний

потенціал, однак потребують різних інфраструктурних умов. Гібридний автобус може бути проміжним рішенням, якщо місто не має готової зарядної або тягової інфраструктури. Дизельний автобус залишається гнучким з погляду організації маршрутів, але поступається за екологічними критеріями. Отже, вибір технології повинен залежати від конкретного маршруту, пасажиропотоку, фінансових можливостей і довгострокової транспортної стратегії міста.

Третій дослід показав значення цифрових даних для екологізації пасажирських перевезень. Аналіз GPS-моніторингу дозволяє виявити ділянки, де громадський транспорт втрачає найбільше часу. Умовний приклад продемонстрував, що найбільші затримки виникають на магістральному коридорі та в центральній частині міста. Такі затримки мають не лише транспортний, а й екологічний наслідок: зростають витрати енергії, погіршується регулярність руху, збільшується потреба в рухомому складі та знижується привабливість громадського транспорту. Тому цифровий моніторинг є не допоміжним, а ключовим інструментом управління екологічною ефективністю.

Четвертий дослід підтвердив доцільність багатокритеріального оцінювання. Найкращим рішенням виявився не один ізольований захід, а поєднання організаційних, цифрових і технічних рішень. Сценарій пріоритету громадського транспорту має перевагу за швидкістю впровадження і вартістю, тоді як комплексний сценарій забезпечує сильніший довгостроковий ефект. Це дозволяє сформулювати важливий практичний висновок: екологізацію доцільно здійснювати поетапно. Спочатку можуть впроваджуватися відносно швидкі заходи управління рухом, а далі — поступове оновлення рухомого складу та розвиток інфраструктури.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в комплексному поєднанні технічного, екологічного, цифрового та організаційного підходів до аналізу пасажирського транспорту. У роботі екологічний вплив розглянуто не як властивість окремого транспортного засобу, а як результат функціонування всієї транспортної системи. Це означає, що викиди, шум, енергоспоживання та якість обслуговування пасажирів оцінюються у взаємозв'язку. Такий підхід дозволяє

перейти від питання «який транспортний засіб є екологічнішим» до питання «за яких умов транспортна система стає екологічно ефективнішою».

Новизна також полягає в тому, що методи дослідження були пов'язані безпосередньо із задачами роботи. Для кожної задачі визначено групу методів, а потім обрано найдоцільніший метод для проведення розрахунково-аналітичного дослідження. Це дозволило показати не лише перелік можливих методів, а й логіку їх практичного використання. Такий підхід є важливим для транспортних досліджень, оскільки часто методи описуються окремо від управлінських рішень. У цій роботі методи пов'язані з конкретними рішеннями: заміною рухомого складу, аналізом затримок, оптимізацією маршрутів і вибором сценарію екологізації.

Окремим елементом наукової новизни є використання питомих і системних показників. У роботі підкреслено, що абсолютні викиди не дають повної картини без урахування пасажиромісткості, завантаженості, довжини маршруту та режиму руху. Це важливо, оскільки громадський транспорт може бути екологічно ефективним лише за умови достатнього пасажиропотоку та якісної організації роботи. Якщо транспортний засіб рухається напівпорожнім або постійно затримується в заторах, його потенційні екологічні переваги зменшуються. Тому оцінювання повинно здійснюватися не лише на рівні техніки, а й на рівні транспортної послуги.

Сильними сторонами дослідження є його системність і послідовність. Робота не обмежується одним видом транспорту або одним екологічним показником, а розглядає пасажирський транспорт як складну міську систему. До аналізу включено рухомий склад, енергетичну інфраструктуру, цифрові дані, маршрути, затори, пасажиропотоки та якість транспортного обслуговування. Це дозволяє отримати більш реалістичне уявлення про умови зменшення екологічного впливу. Сильною стороною також є те, що теоретичний огляд методів доповнено прикладами їх застосування, тобто дослідження має не лише описовий, а й прикладний характер.

Ще однією сильною стороною є орієнтація на практичні рішення для міського управління. Запропонована логіка може бути використана органами місцевого самоврядування або транспортними підприємствами для попереднього оцінювання сценаріїв модернізації. Наприклад, місто може спочатку провести інвентаризацію джерел впливу, потім розрахувати викиди, проаналізувати GPS-дані, визначити проблемні ділянки і лише після цього ухвалювати рішення про закупівлю нового рухомого складу. Такий підхід зменшує ризик неефективних витрат і дозволяє спрямовувати ресурси на ті заходи, які дадуть найбільший екологічний та соціальний ефект.

Слабкі сторони дослідження пов'язані насамперед із тим, що проведені досліді мають умовний розрахунково-аналітичний характер. У роботі використано модельні значення пробігу, витрат пального, енергоспоживання, затримок і бальних оцінок. Це дозволило продемонструвати методику, але не замінює повноцінного емпіричного дослідження конкретного міста. Для практичного впровадження необхідні фактичні дані транспортних операторів, результати польових вимірювань, дані електронного квитка, GPS-моніторингу, енергоспоживання та екологічного моніторингу. Без таких даних висновки залишаються методично обґрунтованими, але потребують уточнення.

Ще одним обмеженням є спрощене врахування життєвого циклу транспортних технологій. У роботі зазначено необхідність такого аналізу, однак повний розрахунок життєвого циклу потребує значного обсягу даних про виробництво транспортних засобів, акумуляторів, інфраструктури, технічне обслуговування та утилізацію. Такі дані часто є складними для отримання або залежать від конкретного виробника. Крім того, екологічний ефект електротранспорту суттєво залежить від структури виробництва електроенергії, яка може змінюватися в часі. Тому результати потрібно розглядати як методичну основу, а не як остаточну оцінку для всіх міст.

До слабких сторін також можна віднести обмежене врахування поведінкових факторів. У роботі зазначено, що пасажери переходять на громадський транспорт лише за умови його зручності, надійності та доступності.

Проте фактична зміна транспортної поведінки залежить також від доходів населення, вартості паркування, культури користування автомобілем, безпеки, погодних умов і довіри до міських сервісів. Для повнішого аналізу потрібні соціологічні опитування, аналіз транспортних звичок і моделювання вибору виду пересування. Без цього складно точно оцінити, наскільки певний екологічний захід зменшить кількість автомобільних поїздок.

Практичні результати дослідження полягають у формуванні послідовної схеми оцінювання технологій зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту. Поперше, запропоновано логіку вибору методів відповідно до поставлених задач. По-друге, показано приклади розрахунків, які можуть бути адаптовані до фактичних даних конкретного міста. По-третє, обґрунтовано, що найбільш доцільним є комплексний сценарій, який поєднує цифровий моніторинг, пріоритет громадського транспорту, оптимізацію маршрутів і поступову електрифікацію. По-четверте, показано, що швидкі організаційні заходи можуть стати першим етапом екологізації ще до масштабних інвестицій у новий рухомий склад.

Практичне значення має також висновок про пріоритетність маршрутів і ділянок. Електрифікація або оновлення рухомого складу повинні перш за все впроваджуватися там, де транспорт проходить через щільну житлову забудову, має великий пасажиропотік або створює значні затримки. Виділені смуги й пріоритет на світлофорах доцільно впроваджувати на ділянках, де GPS-дані показують найбільші втрати часу. Пересадкові вузли потрібно розвивати там, де вони можуть зменшити потребу в дублюванні маршрутів і скоротити зайву транспортну роботу. Таким чином, результати дослідження можуть бути використані як основа для поетапної програми екологізації міського пасажирського транспорту.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з переходом від умовних прикладів до аналізу реальних транспортних даних. Насамперед доцільно провести дослідження на прикладі конкретного міста або окремої маршрутної мережі. Для цього потрібно зібрати GPS-дані рухомого складу, інформацію про

пасажиропотоки, витрати пального або електроенергії, дані про затори та екологічні показники. На основі цих даних можна побудувати детальні сценарії модернізації та оцінити їх не умовно, а кількісно. Особливо важливим є порівняння сценаріїв повної електрифікації, часткової електрифікації, розвитку тролейбусної або трамвайної мережі та організаційного пріоритету громадського транспорту.

Подальші дослідження також мають включати повний аналіз життєвого циклу транспортних рішень. Це дозволить оцінити не лише експлуатаційні викиди, а й екологічний слід виробництва, інфраструктури, акумуляторів, ремонту та утилізації. Перспективним є також поєднання транспортного моделювання з екологічним моделюванням якості повітря. Такий підхід дозволить визначити, як зміна маршрутів або рухомого складу впливає на концентрацію забруднювальних речовин у конкретних районах міста. Крім того, доцільно досліджувати поведінкові аспекти: які саме умови змушують пасажирів відмовлятися від приватного автомобіля на користь громадського транспорту.

Важливою перспективою є створення цифрової системи моніторингу екологічної ефективності пасажирського транспорту. Така система може об'єднувати GPS-дані, електронний квиток, інформацію про енергоспоживання, затори, якість повітря та скарги пасажирів. На її основі місто зможе не лише разово оцінювати транспортні рішення, а й постійно відстежувати їх ефективність. Це особливо важливо, оскільки транспортна система змінюється в часі: змінюються пасажиропотоки, забудова, тарифи, енергетика та поведінка населення. Постійний моніторинг дозволить коригувати рішення і підтримувати екологічний ефект у довгостроковій перспективі.

Окремо слід обговорити управлінські наслідки отриманих результатів. Для міста важливо не лише визначити екологічно бажаний варіант, а й побудувати реалістичний механізм його впровадження. Якщо транспортна політика обмежується закупівлею нового рухомого складу без зміни маршрутної мережі, пріоритету руху та цифрового контролю, очікуваний ефект може бути неповним. Навпаки, навіть відносно недорогі організаційні заходи можуть швидко

покращити роботу громадського транспорту, якщо вони спрямовані на найпроблемніші ділянки. Саме тому результати дослідів свідчать про доцільність поетапної програми, у якій перший етап пов'язаний з аналізом даних і управлінням рухом, другий — з оптимізацією маршрутної мережі, а третій — з поступовою електрифікацією або розвитком рейкового транспорту.

Важливим практичним питанням є визначення пріоритетів фінансування. У міських умовах ресурси зазвичай обмежені, тому одночасне оновлення всього парку є малоімовірним. Запропонований підхід дозволяє визначити, які маршрути мають найбільший екологічний і соціальний ефект від модернізації. Пріоритетними мають бути маршрути з великим пасажиропотоком, високою частотою руху, проходженням через щільну житлову забудову та значними затримками. Саме на таких маршрутах заміна рухомого складу або впровадження пріоритету громадського транспорту дає найбільше скорочення питомих викидів. Це дозволяє перейти від рівномірного розподілу ресурсів до цільового управління екологічним ефектом.

Не менш важливим є питання ризиків упровадження. До технічних ризиків належать недостатня потужність електромережі, відсутність зарядної інфраструктури, складність обслуговування нового рухомого складу та залежність від постачання запасних частин. До організаційних ризиків належать слабка координація між перевізниками, недостатня якість даних, опір змінам маршрутної мережі та відсутність стабільного фінансування. До соціальних ризиків можна віднести невдоволення пасажирів у разі зміни звичних маршрутів або пересадок. Тому кожне рішення має супроводжуватися не лише технічним обґрунтуванням, а й комунікацією з користувачами, пілотним тестуванням і моніторингом результатів.

Отримані результати також мають значення для формування екологічних показників міської транспортної політики. Замість того щоб оцінювати успіх лише за кількістю закуплених електробусів або кілометрами нових маршрутів, доцільно використовувати показники питомих викидів, енерговитрат на пасажиро-кілометр, регулярності руху, середньої швидкості громадського

транспорту, частки поїздок громадським транспортом і рівня задоволеності пасажирів. Такі показники краще відображають реальний результат для міста. Вони також дозволяють порівнювати різні заходи між собою і коригувати транспортну політику на основі фактичних даних. Таким чином, дослідження підкреслює необхідність переходу від формальних показників модернізації до показників реального екологічного ефекту.

Окремої уваги потребує поетапність реалізації запропонованих заходів. Для більшості міст одночасне оновлення всього рухомого складу, перебудова маршрутної мережі та створення повної зарядної інфраструктури є фінансово складним завданням. Тому доцільним є сценарний підхід, за якого спочатку визначаються найбільш проблемні маршрути й ділянки з найбільшим екологічним навантаженням. На першому етапі можуть упроваджуватися організаційні заходи з відносно невисокою вартістю: коригування розкладів, зменшення простоїв, поліпшення диспетчерського контролю, створення пріоритету на окремих перехрестях. На другому етапі доцільно здійснювати точкову модернізацію рухомого складу на маршрутах, де очікуваний ефект буде найбільшим. Лише після цього можна переходити до масштабного оновлення системи та довгострокових інфраструктурних проєктів.

Практичне значення результатів полягає також у тому, що вони дозволяють обґрунтовувати інвестиційні рішення. Екологічні заходи у транспорті часто потребують значних початкових витрат, тому їх необхідно оцінювати не тільки за ціною закупівлі техніки, а й за сукупним ефектом протягом усього строку експлуатації. До такого ефекту належать зниження витрат на енергію, скорочення шкідливих викидів, підвищення надійності перевезень, зменшення заторів і поліпшення якості міського середовища. Якщо ці результати розглядати окремо, модернізація може здаватися надто дорогою. Якщо ж оцінювати їх комплексно, стає очевидним, що екологізація транспорту є не лише природоохоронним, а й соціально-економічним завданням.

Важливою умовою використання результатів дослідження є якість вихідних даних. Розрахунки викидів, порівняння технологій і багатокритеріальне

оцінювання залежать від того, наскільки достовірними є дані про пробіг, пасажиропотоки, витрати пального, споживання електроенергії, затримки та фактичну швидкість руху. Якщо дані збираються нерегулярно або не перевіряються, управлінські рішення можуть бути неточними. Тому цифровізація транспортної системи повинна включати не лише встановлення обладнання, а й створення правил збирання, зберігання, перевірки та аналізу інформації. Це перетворює транспортні дані на повноцінний ресурс міського управління.

Соціальний аспект також має істотне значення для інтерпретації результатів. Екологічні технології будуть ефективними лише тоді, коли пасажир реально користуватиметься громадським транспортом. Якщо після оновлення рухомого складу система залишається незручною, нерегулярною або погано інтегрованою з іншими видами пересування, частина населення продовжуватиме обирати приватний автомобіль. У такому разі потенційний екологічний ефект буде реалізований не повністю. Тому під час упровадження заходів потрібно враховувати комфорт поїздки, доступність зупинок, зрозумілість маршрутів, можливість зручної пересадки та наявність інформації в реальному часі. Екологічна ефективність громадського транспорту безпосередньо пов'язана з його привабливістю для користувача.

Результати дослідження також демонструють, що екологізація пасажирського транспорту має оцінюватися в динаміці. Одноразовий розрахунок або порівняння сценаріїв дає лише початкове уявлення про можливий ефект. Після впровадження заходів необхідно повторно вимірювати показники, порівнювати їх із базовим станом і визначати, чи справді досягнуто очікуваного результату. Такий підхід дозволяє уникнути ситуації, коли модернізація формально відбулася, але транспортна система не стала суттєво ефективнішою. Постійний моніторинг створює зворотний зв'язок між плануванням, реалізацією та коригуванням транспортної політики.

У контексті довгострокового розвитку міста результати дослідження показують, що пасажирський транспорт має розглядатися як частина ширшої політики сталої мобільності. Екологічний ефект буде обмеженим, якщо

громадський транспорт не інтегрований з пішохідною та велосипедною інфраструктурою, пересадковими вузлами, тарифною політикою і просторовим плануванням. Навпаки, коли транспортна система забезпечує зручну альтернативу приватному автомобілю, екологічний ефект посилюється за рахунок зміни транспортної поведінки населення. Це означає, що практичні результати роботи можуть бути використані не лише для транспортних підприємств, а й для міського планування загалом. Екологізація транспорту повинна стати складовою формування компактного, доступного й комфортного міського середовища.

У підсумку обговорення результатів підтверджує, що зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту є багатофакторною задачею. Найкращі результати можуть бути досягнуті лише за умови поєднання технічного оновлення, цифрового управління, організаційного пріоритету громадського транспорту та орієнтації на пасажирів. Наукова цінність роботи полягає в системному поєднанні цих складових, а практична цінність — у можливості використання запропонованої логіки для підготовки реальних міських рішень. Отримані результати не завершують дослідження теми, але формують основу для подальшого поглибленого аналізу, заснованого на фактичних даних і моделюванні конкретних транспортних систем.

### **2.1.7 Висновки**

У роботі досліджено технології зменшення екологічного впливу пасажирського транспорту в міському середовищі та обґрунтовано необхідність їх комплексного застосування. Встановлено, що екологічні проблеми міських пасажирських перевезень пов'язані не лише з типом рухомого складу або видом пального, а й з організацією маршрутної мережі, режимами руху, рівнем завантаження транспортних засобів, якістю транспортної послуги, просторовою структурою міста та транспортною поведінкою населення. Тому зменшення негативного впливу транспорту на довкілля потребує системного підходу, який поєднує технічні, цифрові, інфраструктурні, організаційні та управлінські рішення.

Проведений аналіз літератури показав, що сучасні дослідження сталої міської мобільності приділяють значну увагу електрифікації транспорту, оцінюванню життєвого циклу транспортних засобів, цифровому управлінню рухом, оптимізації маршрутів, розвитку громадського транспорту та багатокритеріальному вибору транспортних рішень. Разом з тим більшість підходів є ефективними лише тоді, коли вони застосовуються не ізольовано, а як взаємопов'язані складові єдиної транспортної політики міста. Це підтверджує актуальність комплексного розгляду технологій екологізації пасажирського транспорту.

У межах роботи визначено мету, об'єкт, предмет і задачі дослідження, а також сформовано методичну основу для оцінювання екологічної ефективності транспортних рішень. Доцільними для цієї теми визнано метод розрахунку викидів, порівняльний техніко-екологічний аналіз, аналіз цифрових даних GPS-моніторингу, багатокритеріальне оцінювання сценаріїв, системний аналіз і узагальнення наукових джерел. Поєднання цих методів дозволяє оцінювати транспортні рішення не за одним показником, а з урахуванням екологічних, експлуатаційних, економічних і соціальних чинників.

Результати розрахункового дослідження засвідчили, що заміна дизельного автобуса на електробус може суттєво скоротити викиди CO<sub>2</sub> на умовному маршруті. За прийнятими вихідними даними добові викиди для дизельного автобуса становили 1216,5 кг CO<sub>2</sub>, тоді як для електробуса з урахуванням непрямих викидів від виробництва електроенергії — 630,0 кг CO<sub>2</sub>. Отже, очікуване скорочення становить приблизно 586,5 кг CO<sub>2</sub> на добу, або близько 48,2%. Це підтверджує значний екологічний потенціал електрифікації, але також показує необхідність урахування джерел електроенергії, умов заряджання, режиму експлуатації та повного життєвого циклу транспортного засобу.

Порівняльний аналіз різних видів рухомого складу показав, що електробуси, тролейбуси й трамваї мають високий екологічний потенціал, однак потребують відповідної інфраструктури та належної організації експлуатації. Гібридні автобуси можуть використовуватися як перехідне рішення, особливо за

відсутності розвиненої зарядної або тягової інфраструктури. Дизельні автобуси зберігають перевагу з погляду гнучкості використання, але поступаються за екологічними характеристиками. Тому вибір технології має здійснюватися з урахуванням пасажиропотоку, довжини маршруту, інтенсивності руху, фінансових можливостей міста та довгострокової стратегії розвитку транспортної системи.

Аналіз цифрових даних підтвердив, що GPS-моніторинг, електронний квиток та автоматизований облік пасажиропотоків є важливими інструментами екологізації міського транспорту. Вони дозволяють виявляти ділянки із затримками, нерівномірністю руху, нераціональним використанням рухомого складу та перевантаженням окремих напрямків.

Отримані дані можуть бути використані для коригування інтервалів, зміни маршрутної мережі, упровадження пріоритету громадського транспорту, оптимізації пересадок і зменшення зайвого пробігу. Таким чином, цифровізація є не лише засобом контролю, а й основою для прийняття екологічно обґрунтованих управлінських рішень.

Багатокритеріальне оцінювання сценаріїв показало, що найкращі результати можуть бути досягнуті за умови поєднання кількох напрямів модернізації. Сценарій повної електрифікації забезпечує значне скорочення локальних викидів, але потребує великих інвестицій. Сценарій пріоритету громадського транспорту є відносно швидким і менш витратним способом підвищення ефективності перевезень. Комплексний сценарій, який об'єднує технічне оновлення, цифрове управління, організаційні заходи та покращення якості послуги, є найбільш збалансованим, оскільки враховує як екологічні, так і соціально-економічні результати.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонована логіка дослідження може бути використана органами місцевого самоврядування, транспортними підприємствами та проєктувальниками для підготовки програм екологізації міського пасажирського транспорту. До першочергових заходів належать збирання достовірних транспортних даних, визначення найбільш

проблемних маршрутів, упровадження пріоритету громадського транспорту, поступова заміна найбільш екологічно шкідливого рухомого складу, розвиток зарядної або тягової інфраструктури, покращення пересадок і підвищення якості інформаційного обслуговування пасажирів.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що екологізація пасажирського транспорту повинна розглядатися як довгостроковий процес переходу до сталої міської мобільності. Її успішність залежить від узгодження технічних рішень із транспортним плануванням, енергетичною політикою, фінансовими можливостями міста та потребами пасажирів. Найбільший екологічний ефект досягається тоді, коли громадський транспорт стає реальною альтернативою приватному автомобілю: швидкою, регулярною, доступною, зручною та інтегрованою з іншими видами пересування.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні запропонованих підходів до реальної маршрутної мережі конкретного міста, використанні фактичних даних GPS-моніторингу та електронного квитка, розрахунку викидів за різними енергетичними сценаріями, оцінюванні життєвого циклу рухомого складу та моделюванні впливу транспортних заходів на зміну поведінки пасажирів. Це дозволить поглибити отримані результати й перейти від умовних прикладів до практичних рекомендацій для конкретних міських транспортних систем.

### SECTION 3. LIVESTOCK

DOI: 10.46299/ISG.2026.MONO.AGRO.2.3.1

#### **3.1 Improvement of moisture calculations of multicomponent silage crops on the basis of the developed formulas**

The leading role in providing the population with food and solving socio-economic problems in society is played by animal husbandry and, above all, cattle breeding, which has a comprehensive impact on the volume of agricultural production and the growth of the economy as a whole.

In the overall structure of agricultural production, about 40% of gross production is occupied by livestock farming, which is a strategically important industry because it provides the population with basic food products. The level of economic efficiency of livestock production and in particular its components: dairy and meat livestock farming, largely determines the efficiency of the functioning of the entire food sub-complex of the country. The main direction of further development of livestock farming and increasing its economic efficiency is to ensure competitive production based on strengthening the feed base and increasing the level of animal feeding [150].

One of the leading sectors of the agro-industrial complex of countries with developed economies is dairy and meat livestock farming, and the issue of producing high-quality bulk feed – hay, silage and silage – is gaining important economic importance, and stem feed (silage, haylage) makes up 40-50% of the cattle ration during the stall period [151].

The development and application of technologies for harvesting bulky forages that ensure the collection of herbs in the optimal phases of vegetation with the greatest preservation of their energy and protein nutritional value is one of the main conditions for the rational use of the grown herb crop [152].

Ensiling is one of the methods of preserving and storing succulent forages - green mass, root and bulbous crops, melon crops, as well as various wastes from vegetable growing and industry that processes agricultural raw materials of plant origin.

In terms of chemical composition, silage is similar to the starting material, but prete differs from it in the increased content of organic acids (lactic, acetic). The nutritional value of silage depends on the type, quality of the starting material and the preparation technology. On average, the energy value of 1 kg of silage is 1,78-2,45 MJ ME<sup>Cattle</sup> (0,15-0,25 FE). The most valuable ones include silage made from corn, cereal-legume grass mixtures, sunflower, as well as special (combined) silages for calves, pigs, and poultry.

The essence of the ensiling process is the fermentation of feed sugars by bacteria into organic acids (mainly lactic acid), which creates an acidic environment (pH 4,0-4,2), in which the ensiled mass is well preserved without access to air.

The process of silage maturation is divided into three phases: the first - the development of mixed microflora, the second - intensive development of lactic acid bacteria and acidification of the mass, the third - the death of lactic acid bacteria under the influence of their own metabolites. Good quality silage has a pH of 4,2, acidic – 3,9-4,0 and overacidified – 3,7-3,8.

The main condition for the preparation of high-quality silage is a sufficient (optimal) sugar content in the raw material. Therefore, in the theory of ensiling there is a concept of sugar minimum, which is the amount of sugar in the ensiled mass, which is necessary for the accumulation of lactic acid to shift the pH to 4,2. The amount of sugar, which ensures a rapid and sufficient accumulation of acids for the preservation of the silage mass, varies depending on the composition of the plant sap and its so-called buffer properties. The buffering capacity of the juice is determined by the content of protein and its decomposition products, phosphates, alkaline salts, organic acids capable of binding acids formed from sugars. Buffering capacity is the ability of the plant mass to neutralize part of the fermentation acids, which may be insufficient to create the necessary acidity. The higher the buffering capacity, the worse the plants are ensiled.

The ratio of sugar content to buffer capacity (g/kg) is the main indicator of the ensiling capacity of forage crops and should be at the level of 3,5-4,0.

The ensiling capacity of raw materials largely depends on the ratio between the sugar minimum and the actual sugar content in it. According to this characteristic, all plants are divided into those that are easily ensiled (contain more sugar than is needed to form the required amount of lactic acid); difficult to ensile (contain such an amount of sugar that only with its complete conversion into lactic acid can it be sufficient to ensure the required level of acidification of the feed); not ensiled (contain an insufficient amount of sugar that, even with its complete conversion into lactic acid, does not provide normal conditions for preservation).

In addition to the sugar content, the ratio and the ratio between the sugar minimum and the actual sugar content, to characterize the ensiling of forage crops, it is necessary to know the dry matter content in the mass being ensiled.

When ensiling too moist forages, dry matter (straw, chaff, etc.) is added to them so that the moisture content of the mixture does not exceed 70%. The greatest losses of nutrients are observed when ensiling the mass with a moisture content of more than 80%. The ratio of dry and wet components to obtain a mixture with the desired moisture content can be determined by Pearson's square [153, 154].

The Pearson square method is widely used in the food, chemical and other industries, as well as in agriculture - for example, during ensiling to determine the ratio of dry and wet components in order to obtain a mixture with the desired moisture content, when calculating rations [155, 156, 157, 158], which allows you to determine the ratio of feeds, as well as the balance of two main indicators of the diet for multi-component feed mixtures [159], when normalizing milk by fat, when producing sausages, when blending alcoholic beverages, i.e. anywhere where it is necessary to calculate the amount of two components that need to be mixed together to obtain the final planned concentration [160, 161, 162, 163].

The purpose of our research was to derive formulas for calculating the ratio of components for ensiling, depending on their initial moisture content, to obtain the planned moisture content of the multicomponent silage mass in order to simplify calculations.

Calculations of the ratio of silage mass components in the mixture to the planned moisture content were determined by the "Pearson square" method, which was also used to calculate the initial sugar content in the silage mass. Based on the data on the ratio of the two components for ensiling, obtained by the Pearson square method, the equation was considered in a general form to derive formulas for calculating the ratio of the volume of each component for ensiling, depending on their initial moisture content, to the planned moisture content of the mixture.

The essence of the Pearson square method is that in the center of the square we place the planned calculation unit, and in its upper corners - the actual data of the parameters of the initial components (whether it is humidity, acidity, temperature, etc.).

From the numbers near the upper corners of the square, we subtract the value located in the center of the square diagonally, and display the results near its lower corners. The modular values of the results will be equal to the number of parts of each component in their mixture [159].

In the following, a proportion follows, which was considered in general form and from which formulas for solving this problem were derived.

When ensiling too wet forages, dry (straw, chaff) is added to them to stabilize the mixture at a humidity that does not exceed 70%, since the greatest losses of nutrients are observed when ensiling mass with a humidity of 80% [153].

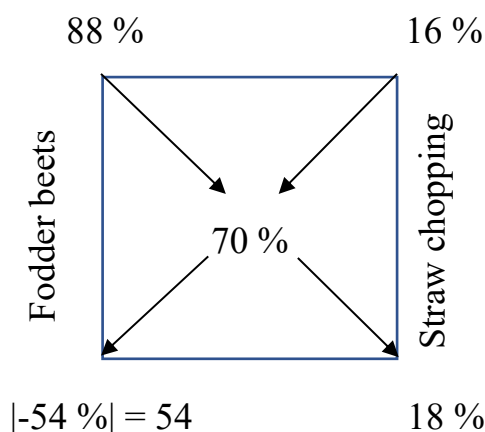
The ratio of dry and wet components to obtain a mixture with the desired moisture content can be determined using the Pearson square method, in the middle of which the planned moisture content of the silo is placed, and near the upper corners - the actual moisture content of the components. Calculations are carried out along the diagonal of the square by subtraction and the results are recorded near its lower corners [161].

Let's look at this with examples.

**Example 1.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beets, with a moisture content of 88%, with a sugar content of 4%, and chopped straw, with a moisture content of 16%, with a sugar content of 0.6%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70%.

For calculations, we will use the “Pearson square” method. We draw a square (Fig. 1), in the center of which we put the planned silage humidity of 70%, and near the upper corners – the actual humidity of fodder beets (88%) and chopped straw (16%).

From the numbers near the upper corners of the square, we subtract the value located in the center of the square diagonally, and display the results near its lower corners. The modules of the values will be equal to the number of parts of fodder beet and chopped straw in their mixture.



**Figure 1.** Calculation of the required amount of chopped straw to the amount of fodder beets to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

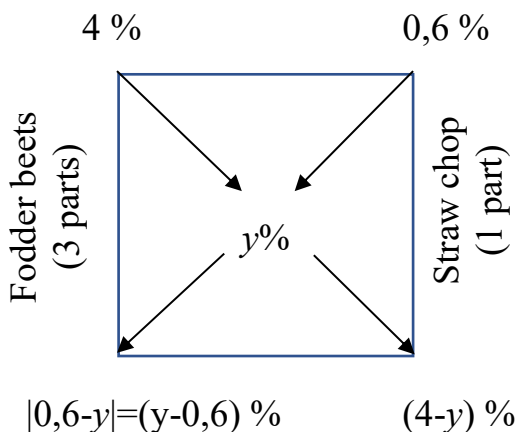
Calculation:  $16 - 70 = -54$ ;  $88 - 70 = 18$ . In the following, we use the moduli of negative numbers:  $|-54| = 54$ . The ratio of the amount of fodder beet to the amount of chopped straw is 54:18. Reducing the ratio by 18, we get 54:18=3. So, for 3 parts of fodder beets, you should take 1 part of chopped straw (for example, for 3 quintals of beets, 1 quintal of straw).

Let's check whether the moisture content of the laid mass will be in this case 70%.

3 quintals of fodder beet, with a moisture content of 88%, contain  $3:100 \times 88 = 2.64$  quintals of water, and 1 quintal of chopped straw, with a moisture content of 16%,

contains  $1:100 \times 16 = 0.16$  quintals of water. In total, 3 quintals + 1 quintal = 4 quintals of the mixture contain  $2.64$  quintals +  $0.16$  quintals =  $2.8$  quintals of water, which is  $\frac{2,8 \times 100}{4} = 70\%$ .

We determine the percentage of sugar in the silage mass using Pearson's square (Fig. 2), denoting it as  $y\%$ .



**Figure 2.** Calculation of sugar content in a mixture of 3 parts of fodder beet and 1 part of chopped straw using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

Calculations:

$0,6\% < y < 4\%$ ;  $0,6 - y < 0$ , therefore, we will use the modulus of a negative number:  $|0,6-y|=y-0,6$ . Numbers  $(y-0,6)\%$  and  $(4-y)\%$  show the ratio of the amount of sugar in fodder beet and chopped straw:  $(y-0,6):(4-y)$  in percentage. At the same time, this ratio in parts is 3:1. We have the proportion  $(y-0,6):(4-y)=3:1$ . Using the basic property of proportion (the product of the extreme terms is equal to the product of the averages), we have  $(y-0,6) \times 1 = (4-y) \times 3$ ;  $y-0,6=12-3y$ ;  $y+3y=12+0,6$ ;  $4y=12,6$ ;  $y=12,6:4$ ;  $y=3,15\%$  - This is the initial sugar content in the silage mass, which consists of a mixture of fodder beet and chopped straw in a ratio of 3:1.

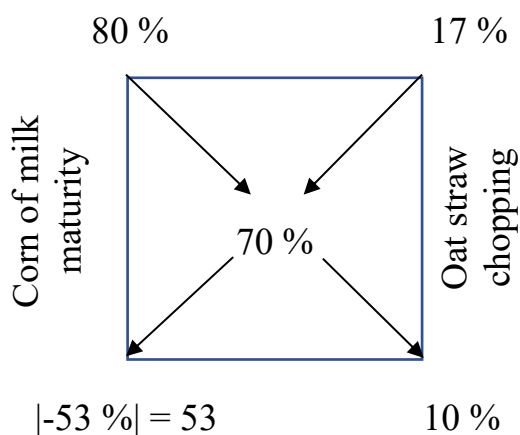
Let's check that this is indeed the case. 3 quintals of fodder beet, with a sugar content of 4%, contain 3 quintals:  $100\% \times 4\% = 0.12$  quintals of sugar, and 1 quintal of chopped straw with a sugar content of 0.6% contains 1 quintal:  $100\% \times 0.6\% = 0.006$  quintals of sugar. In total, 3 quintals + 1 quintal = 4 quintals of silage mass, which

contains  $0.12 \text{ quintals} + 0.006 \text{ quintals} = 0.126 \text{ quintals}$  of sugar, which is  $\frac{0,126 \times 100}{4} = 3,15 \%$ .

**Example 2.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of milk-ripe corn, with a moisture content of 80%, with a sugar content of 2.53% and chopped oat straw, with a moisture content of 17%, with a sugar content of 0.4%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70%.

For calculations, we will also use the “Pearson square” method. We draw a square (Fig. 3), in the center of which we put the planned silage moisture of 70%, and near the upper corners – the actual moisture of corn of milk ripeness (80%) and chopped oat straw (17%).

From the numbers in the upper corners of the square, we subtract the value in the center of the square diagonally, and write the results near its lower corners. The modules of the values will be equal to the number of parts of milk-ripe corn and chopped oat straw in their mixture.



**Figure 3.** Calculation of the required amount of corn of milk maturity to the amount of chopped oat straw to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

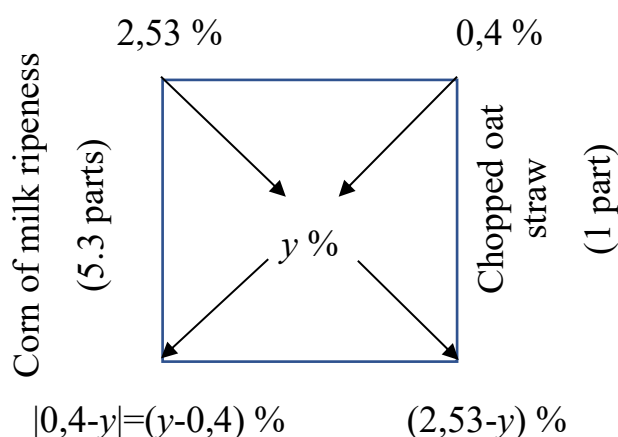
Calculation:  $17 - 70 = -53$ ;  $80 - 70 = 10$ . In the following, we use the modules of negative numbers:  $|-53| = 53$ . The ratio of the amount of corn of milk ripeness to the

amount of chopped oat straw is 53:10. Reducing the ratio by 10, we get 5.3:1. So, for 5.3 parts of corn of milk ripeness, 1 part of chopped oat straw should be taken.

Let's check whether in this case the humidity of the laid mass will be 70%.

5.3 quintals of corn of milk maturity, with a moisture content of 80%, contains  $\frac{5,3 \times 80}{100} = 4,24$  centners of water, and 1 centner of chopped straw with a moisture content of 17% contains  $\frac{1 \times 17}{100} = 0,17$  centners of water. A total of 5.3 centners + 1 centner = 6.3 centners of the mixture, which contains 4.24 centners + 0.17 centners = 4.41 centners of water, which is  $\frac{4,41 \times 100}{6,3} = 70\%$ .

Knowing the ratio of corn to straw and the sugar content in corn (2.53%) and straw (0.4%), we determine the initial percentage of sugar in the silage mass using Pearson's square (Fig. 4), denoting it  $y\%$ .



**Figure 4.** Calculation of sugar content in a mixture of 5.3 parts of milk-ripe corn and 1 part of chopped oat straw using the Pearson square method  
Source of the figure: developed by the authors.

Calculations:

Numbers  $(y-0,4)\%$  and  $(2,53-y)\%$  show the ratio of the amount of sugar in corn to the amount of sugar in chopped straw:  $(y-0,4):(2,53-y)$  in percentages. At the same time, this ratio in parts is 5.3:1. Маємо пропорцію  $(y-0,4):(2,53-y)=5,3:1$ . Using the basic property of proportion (the product of the extreme terms is equal to the product

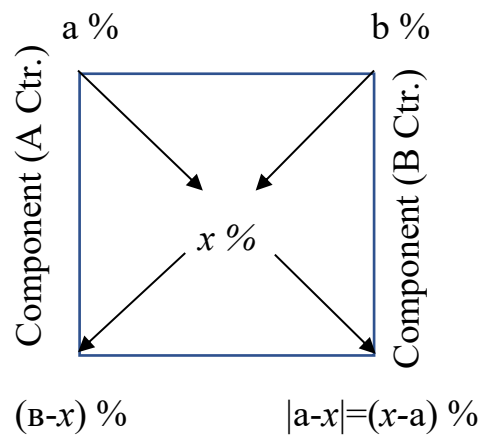
of the averages), we have  $(y-0,4) \times 1 = (2,53-y) \times 5,3$ ;  $y-0,4 = 13,41 - 5,3y$ ;  $y + 5,3y = 13,41 + 0,4$ ;  $6,3y = 13,81$ ;  $y = 13,81 : 6,3$ ;  $y = 2,2\%$  - this is the initial sugar content in the silage mass, which consists of a mixture of corn and chopped straw in a ratio of 5,3:1.

Let's check that this is indeed the case. 5.3 quintals of corn with a sugar content of 2.53% contains  $\frac{5,3 \times 2,53}{100} = 0,134$  centners of sugar, and 1 centner of chopped straw with a sugar content of 0.4% contains  $\frac{1 \times 0,4}{100} = 0,004$  centners of sugar. In total, 5.3 centners + 1 centner = 6.3 centners of silage mass, which contains 0.134 centners + 0.004 centners = 0.138 centners of sugar, which is  $\frac{0,138 \times 100}{6,3} = 2,19 \approx 2,2\%$ , which fully satisfies the requirements for the initial sugar content in the silage mass for ensiling.

If two crops with a certain moisture content  $a\%$  and  $b\%$  are used for ensiling, then the planned moisture content of the silage mass  $x\%$  cannot be less than or greater than both indicators  $a$  and  $b$ . Therefore, when calculating on the diagonals of the square near the lower corners, it is impossible to obtain two positive or two negative numbers at the same time.

Therefore, the number written in the center of the square must be between the numbers written near the upper corners of the square in magnitude:  $a < x < b$ , or  $a > x > b$ . Then near the lower corners of the square we will get one result - positive, and the second - negative, which we will replace with its modulus.

Using Pearson's square (Fig. 5), we derive a formula for calculating the ratio of the amount of each component for laying in silage, depending on their moisture content, for only two crops. Let us denote:  $A$  – mass of the first component, centners;  $a$  – humidity of the first component, %;  $B$  – mass of the second component, centners;  $b$  – humidity of the second component, %, where  $b > a$ ;  $x$  – planned moisture content of the resulting mass, %. We will perform the calculations similarly to the numerical problem:



**Figure 5.** Derivation of the formula for calculating the ratio of the amount of each component for laying in silage of two crops, depending on their moisture content, using Pearson's square

Source of the figure: developed by the authors.

Calculations: since  $a \% < x \% < b \%$ , then  $b - x > 0$ ,  $a - x < 0$ , therefore we use the moduli of negative numbers:  $|a-x|=x-a$ . The numbers at the lower corners of the square  $(b-x) \%$  and  $(x-a) \%$  show the ratio between the specific gravity of the components in the silo in percent:  $(b-x)\%:(x-a)\%$ . Let's express this same ratio in terms of their mass A:B. We have the proportion:  $(b-x):(x-a)=A:B$ , from here we obtain the formula for the ratio by mass between the two components, depending on their humidity:  $A:B=(b-x):(x-a)$ , and if  $a>x>b$ , then we have the formula in the following form:

$$A : B = (x - b) : (a - x); \tag{1}$$

Using the basic property of proportion (the product of the extreme terms is equal to the product of the averages), we have:

$(b-x) \times B = A \times (x-a)$ ;  $b \times B - x \times B = A \times x - A \times a$ . We will move the terms that contain the unknown value  $x$  to one side, and those without  $x$  to the other.

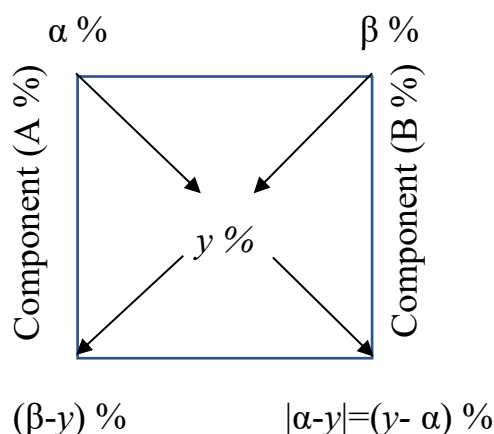
$B \times B + A \times a = x \times B + A \times x$ ;  $x \times (A+B) = A \times a + B \times b$ . We have a formula for calculating the planned moisture content of the resulting mass from the two components of crops to be ensiled, %:

$$x = \frac{A \times a + B \times b}{A + B}; \tag{2}$$

Let us derive the formula for the dependence of the mass of one of the components on the mass of the other. From the proportion  $(b-x):(x-a)=A:B$ ;  $(b-x) \times B = A \times (x-a)$ , hence the formula for the dependence of the mass of component A on the mass of component B:

$$A = \frac{B \times (x-b)}{a-x}; \quad (3)$$

Using Pearson's square (Fig. 6), we derive the formula for calculating the initial sugar content in silage mass for two crops. Let us consider the problem in general form. Let us denote: A is the fraction of the first component, %;  $\alpha$  – sugar content in the first component, %; B – fraction of the second component, %;  $\beta$  – sugar content in the second component, %, where  $\beta > \alpha$ ; y – sugar content in the resulting mass, %. We will perform the calculations similarly to the numerical problem:



**Figure 6.** Derivation of the formula for calculating the initial sugar content in silage mass for two crops in the case  $\alpha \% < y \% < \beta \%$  using Pearson's square  
Source of the figure: developed by the authors.

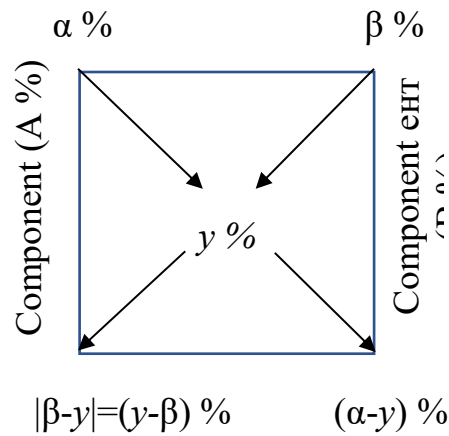
Calculations: since  $\alpha \% < y \% < \beta \%$ , then we have the proportion:

$(\beta-y):(y-\alpha)=A:B$ ;  $(y-\alpha) \times A = (\beta-y) \times B$ ;  $A \times y - A \times \alpha = B \times \beta - B \times y$ ;  $Ay + By = A\alpha + B\beta$ ;  
 $y \times (A+B) = A\alpha + B\beta$ , hence the formula for calculating the initial sugar content in silage mass for two crops:

$$y = \frac{A\alpha + B\beta}{A+B}; \quad (4)$$

If  $\alpha \% > \beta \%$ , then  $\beta \% < \alpha \%$ , i.e.  $\beta \% < y \% < \alpha \%$  (Fig. 7).

We perform the calculations similarly to the numerical problem:



**Figure 7.** Derivation of the formula for calculating the initial sugar content in silage mass for two crops in the case of  $\beta \% < y \% < \alpha \%$  using Pearson’s square

Source of the figure: developed by the authors.

$|\beta - y| = y - \beta$ ;  $(y - \beta) : (\alpha - y) = A : B$ ;  $(y - \beta) \times B = A \times (\alpha - y)$ ;  $y \times B - \beta \times B = A \times \alpha - A \times y$ ;  
 $y \times B + A \times y = A \times \alpha + B \times \beta$ , Hence the formula:  $y = \frac{A\alpha + B\beta}{A + B}$ , which has the same form as formula 4. Therefore, to determine the initial sugar content in the silage mass, formula 4 can be used without comparing the sugar content in components A and B in terms of value, i.e. the values  $\alpha$  and  $\beta$ .

Let’s check the performance of the derived formulas under the above conditions of examples 1 and 2.

**Conditions of example 1.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beet, with a moisture content of 88%, with a sugar content of 4% and chopped straw, with a moisture content of 16%, with a sugar content of 0.6%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what the initial sugar content in the silage mass will be.

We have:

Component 1: fodder beet, weight A, moisture content a (88%), with sugar content  $\alpha$  (4%);

Component 2: chopped straw, weight B, moisture content b (16%), with sugar content  $\beta$  (0,6 %);

$x$  – planned moisture content of the resulting mass, %.

Let's find the ratio between the components in the silage mass using formula 1:  $A: B = (b - x): (x - a) = (16 - 70): (70 - 88) = -54: (-18) = 54: 18 = 3: 1$  . Hence  $A=3$  parts,  $B=1$  part. So, for every 3 quintals of fodder beets, you should take 1 quintal of chopped straw.

Let's check whether, with this ratio of components, the humidity of the silage mass will be  $x=70\%$ , using formula 2:  $x = \frac{A \times a + B \times b}{A + B} = \frac{3 \times 88 + 1 \times 16}{3 + 1} = \frac{280}{4} = 70\%$ . Indeed, the moisture content of the two-component silage mass will be 70%, which indicates the efficiency of formulas 1 and 2.

Let's find the initial sugar content in the silage mass using formula 4:

$y = \frac{A\alpha + B\beta}{A + B} = \frac{3 \times 4 + 1 \times 0,6}{3 + 1} = \frac{12,6}{4} = 3,15\%$ , which coincides with previous calculations, and accordingly indicates the operability of the derived formula.

**Conditions of example 2.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of corn of milk ripeness, with a moisture content of 80%, with a sugar content of 2.53% and chopped oat straw, with a moisture content of 17%, with a sugar content of 0.4%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what will be the initial sugar content in the silage mass.

We have:

Component 1: corn of milk maturity, weight A, humidity a (80%), with sugar content  $\alpha$  (2,53 %);

Component 2: chopped oat straw, weight B, moisture content b (17%), with sugar content  $\beta$  (0,4 %);  $x$  – planned moisture content of the resulting mass, %. Let's find the ratio between the components in the silage mass using formula 1:

$A: B = (b - x): (x - a) = (17 - 70): (70 - 80) = -53: (-10) = 53: 10 = 5,3: 1$ . Hence  $A=5.3$  parts,  $B=1$  part. So, for every 5.3 Ctr. Of corn, you should take 1 Ctr. Of chopped straw.

Let's check whether, with this ratio of components, the moisture content of the dry mass will be  $x=70\%$ , using formula 2:

$x = \frac{A \times a + B \times b}{A + B} = \frac{5,3 \times 80 + 1 \times 17}{5,3 + 1} = \frac{441}{6,3} = 70 \%$ . Indeed, the moisture content of the two-component silage mass will be 70%, which once again indicates the efficiency of formulas 1 and 2.

Let's find the initial sugar content in the silage mass using formula 4:

$y = \frac{A \alpha + B \beta}{A + B} = \frac{5,3 \times 2,53 + 1 \times 0,4}{5,3 + 1} = \frac{13,809}{6,3} = 2,2 \%$ , which coincides with the previous calculations, and, accordingly, once again indicates the efficiency of the derived formula.

Thus, the derived formulas are effective for calculating the indicators of silage mass, which consists of only two components, but in further examples we will calculate similar indicators for silage mass, which consists of a larger number of components.

**Example 3.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of milk-ripe corn, with a moisture content of 80%, with a sugar content of 2.53%, with fodder lupine, with a moisture content of 82%, with a sugar content of 1.93%, and chopped oat straw, with a moisture content of 14%, with a sugar content of 0.012%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70%, and what the initial sugar content in the silage mass will be.

For calculations, we will use the "Pearson square" method. We draw two squares (Fig. 8, 9), in the center of which we put the planned silage humidity of 70%, and near the upper corners – the actual humidity of straw (in two squares 14%), corn (80%) and lupine (82%).

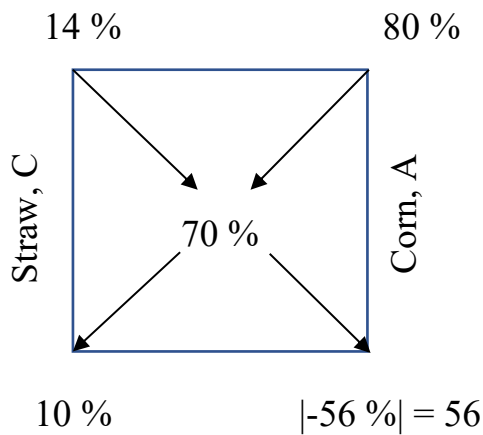
We have:

Component 1: corn of milk ripeness, mass A, humidity a (80%), with sugar content  $\alpha$  (2,53%);

Component 2: fodder lupine, weight B, moisture content b (82%), with sugar content  $\beta$  (1,93%);

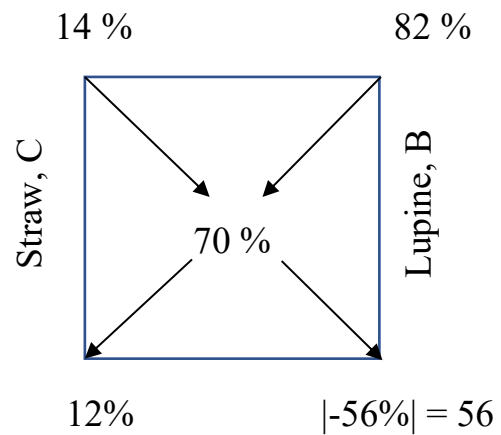
Component 3: oat straw, weight C, moisture content c (14%), with sugar content  $\gamma$  (0,012%).

From the numbers in the upper corners of the square, we subtract the value in the center of the squares diagonally, and display the results near its lower corners.



**Figure 8.** Calculation of the required amount of straw to the amount of corn to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 9.** Calculation of the required amount of straw to the amount of lupine to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

Let's calculate the ratio of the mass of corn to the mass of straw:

A:C=56:10, that is, you need to take 56 parts of corn and 10 parts of straw. Similarly, let's calculate the ratio of the mass of lupine to the mass of straw:

B:C=56:12, that is, you need to take 56 parts of lupine and 12 parts of straw.

So, to obtain silage mass from these three crops, you need to take 10+12=22 parts of straw, that is, the ratio of all components A:B:C=56:56:22. Reducing the ratio by 2, we get A:B:C=28:28:11, which means that for every 28 Ctr. Of corn, you need to take 28 Ctr. Of lupine and 11 Ctr. Of straw.

Let's check whether the humidity of the laid mass will be 70% in this case.

28 quintals of corn with a moisture content of 80% contains  $\frac{28 \times 80}{100} = 22,4$  quintals of water;

28 quintals of lupine with a moisture content of 82% contains  $\frac{28 \times 82}{100} = 22,96$  quintals of water;

11 quintals of straw with a moisture content of 14% contains  $\frac{11 \times 14}{100} = 1,54$  quintals of water;

In total,  $28+28+11=67$  quintals of silage mass from three crops contain  $22.4+22.96+1.54=46.9$  quintals of water, which is  $\frac{46,9 \times 100}{67} = 70\%$

Thus, with a ratio of corn, lupine and straw of 28:28:11, the moisture content of the silage mass will be 70%.

Let's calculate the initial sugar content in the silage mass:

28 quintals of corn with a sugar content of 2.53% contains  $\frac{28 \times 2,53}{100} = 0,71$  quintals of sugar;

28 quintals of lupine, with a sugar content of 1.93%, contains  $\frac{28 \times 1,93}{100} = 0,54$  quintals of sugar;

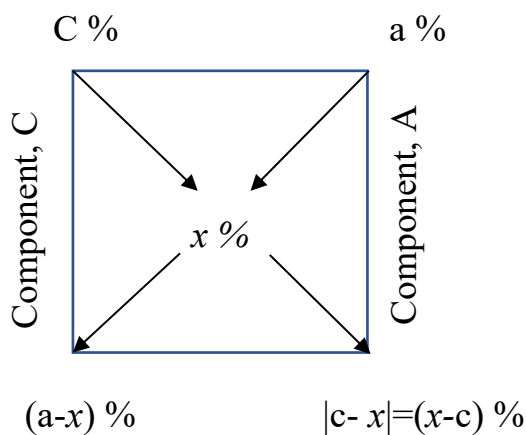
11 quintals of straw with a sugar content of 0.012% contains  $\frac{11 \times 0,012}{100} = 0,001$  quintals of sugar;

In total,  $28+28+11=67$  quintals of silage mass from three crops contains  $0,71+0,54+0,001=1,251$  quintals of sugar, which is  $\frac{1,251 \times 100}{67} = 1,9\%$ , which fully meets the requirements of ensiling.

Using Pearson's square (Fig. 10, 11), we derive the formula for calculating the ratio of the amount of each component for laying in silage, depending on their moisture content, for three forage crops. Let's consider the problem in general form between the components of ensiling A:B:C, where component A is the mass of the first component, quintal; a is the moisture content of the first component, %;  $\alpha$  is the sugar content in the first component; B is the mass of the second component, quintal; b is the moisture content of the second component, %;  $\beta$  is the sugar content in the second component, %; C is the mass of the third component, quintal; c is the moisture content of the third component, %;  $\gamma$  is the sugar content in the third component; x is the planned moisture

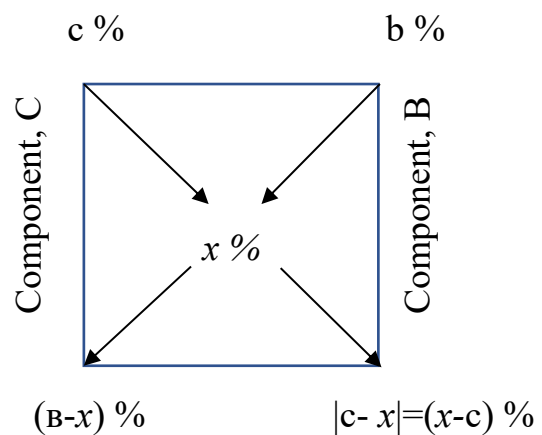
content of the resulting mass, %. In component C, the moisture content is the lowest – c %.

Since of the three humidity indicators a %, b %, c %, the smallest is in the third component, i.e. c %, we will write it near the upper corners of each square on the left, and the humidity indicators of the first and second components a % and b % on the right near the upper corners of the squares. In the center of the squares we will put the planned humidity of the silage mass x %.



**Figure 10.** Calculation of the required amount of component A to the amount of component C to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 11.** Calculation of the required amount of component B to the amount of component C to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

We perform standard calculations and obtain two proportions:  $A:C=(x-c):(a-x)$ . Component A in the silage mass is (x-c) parts, and component C is (a-x) parts.

$B:C=(x-c):(b-x)$ . Component B in the silage mass is (x-c) parts, and component C is (b-x) parts. Therefore, to ensile components A and B together with component C, component C must be in the silage mass

$(a-x)+(b-x)=(a+b-2x)$  parts, that is, we have the formula for the ratio between components A:B:C, depending on the humidity indicators a, b and c, where c is the lowest indicator:

$$A : B : C = (x - c) : (x - c) : (a + b - 2x); \quad (5)$$

From proportions  $A:C=(x-c):(a+b-2x)$  and

$B:C=(x-c):(a+b-2x)$  we have:

$$\begin{cases} A \times (a+b-2x) = C \times (x-c) \\ B \times (a+b-2x) = C \times (x-c) \end{cases} \quad \begin{cases} Aa+Ab-2Ax=Cx-Cc \\ Ba+Bb-2Bx=Cx-Cc \end{cases} \quad \begin{cases} Aa+Ab+Cc=2Ax+Cx \\ Ba+Bb+Cc=2Bx+Cx \end{cases}$$

We perform term-by-term addition of these equalities and obtain:

$$Aa+Ab+Cc+Ba+Bb+Cc=2Ax+2Bx+2Cx; A(a+b)+B(a+b)+2Cc=2x(A+B+C);$$

$(a+b) \times (A+B) + 2Cc = 2x \times (A+B+C)$ , hence the formula for calculating the moisture content of a three-component silage mass,  $x\%$ :

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + 2Cc}{2(A+B+C)}; \quad (6)$$

where: A, B, C – mass of silage components;

a, b, c – percentage moisture content of components A, B, C and c – the lowest value of the numbers a %, b %, c %.

The ratio between the components of silage mass

$$A:B:C=(x-c):(x-c):(a+b-2x) \text{ can be written differently: } \frac{A}{x-c} = \frac{B}{x-c} = \frac{C}{a+b-2x}.$$

From proportion  $\frac{A}{x-c} = \frac{C}{a+b-2x}$  and  $\frac{B}{x-c} = \frac{C}{a+b-2x}$  we have the formula for the dependence of components A and B on component C:

$$A = B = \frac{C(x-c)}{a+b-2x}; \quad (7)$$

where A, B, C are the mass of the silage mass components;

a, b, c are the percentage moisture content of components A, B, C and c is the lowest value of the numbers a %, b %, c %.

Let's check the efficiency of the derived formulas in example 4, where it is necessary to determine in what ratio a mixture of corn of milk ripeness, with a moisture content of 80%, with a sugar content of 2.53%, with fodder lupine, with a moisture content of 82%, with a sugar content of 1.93% and chopped oat straw, with a moisture

content of 14%, with a sugar content of 0.012%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what will be the initial sugar content in the silage mass.

We have:

Component 1: corn of milk ripeness, mass A, humidity a (80%), with sugar content  $\alpha$  (2.53%);

Component 2: fodder lupine, mass B, humidity b (82%), with sugar content  $\beta$  (1.93%);

Component 3: oat straw, mass C, humidity c (14%), with sugar content  $\gamma$  (0.012%);

$x$  (70%) – planned humidity of the resulting mass, %.

Let's calculate the ratio between the components in the silage mass. Humidity  $c=14\%$  - the smallest, compared to other components  $a\%$  and  $b\%$ .

Let's use the derived formula 5 – the dependence between components A, B and C:

$$\begin{aligned} A:B:C &= (x - c):(x - c):(a + b - 2x) = \\ &= (70 - 14):(70 - 14):(80 + 82 - 2 \times 70) = 56:56:22 \end{aligned}$$

Divide the terms of the ratio by 2 and get  $A:B:C=28:28:11$ , so for ensiling you should take 28 parts of corn and lupine and 11 parts of straw. For example, for every 28 quintals of corn you need to take 28 quintals of lupine and 11 quintals of straw.

Let's calculate the moisture content of the silage mass  $x\%$  using formula 6 for calculating the moisture content of a three-component silage mass,  $x\%$ :

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + 2Cc}{2(A+B+C)};$$

where A, B, C – mass of silage components;

a, b, c – percentage moisture of components A, B, C and c – the lowest value of the numbers  $a\%$ ,  $b\%$ ,  $c\%$ .

$$X = \frac{(28+28) \times (80+82) + 2 \times 11 \times 14}{2(28+28+11)} = \frac{9072+308}{2 \times 67} = \frac{9380}{134} = 70\%.$$

As can be seen from the calculations, the moisture values of the three-component silage mass in components A, B, C coincide both according to the Pearson square method and using the derived formula, which indicates its efficiency.

Let's calculate the initial sugar content in the silage mass:

28 quintals of corn, with a sugar content of 2.53%, there is  $\frac{28 \times 2,53}{100} = 0,71$  quintals of sugar;

28 quintals of lupine, with a sugar content of 1.93%, contains  $\frac{28 \times 1,93}{100} = 0,54$  quintals of sugar;

11 quintals of straw with a sugar content of 0.012% contains  $\frac{11 \times 0,012}{100} = 0,00132$  quintals of sugar;

In total,  $28+28+11=67$  quintals of silage mass from three crops contains  $0,71+0,54+0,001=1,251$  quintals of sugar, which is  $\frac{100 \times 1,251}{67} = 1,867 \approx 1,9\%$  sugar, which fully meets the requirements for the initial sugar content in the silage mass for ensiling.

Let us consider the case when a% is the highest humidity index from the numbers a%, b%, c%: in example 4.

**Example 4.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beet, with a moisture content of 88%, with a sugar content of 5%, with chopped wheat straw, with a moisture content of 14%, with a sugar content of 3%, and flax chaff, with a moisture content of 12%, with a sugar content of 0.2%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70%, and what the initial sugar content in the silage mass will be.

For calculations, we will use the "Pearson square" method. We draw two squares (Fig. 12, 13), in the center of which we put the planned silage humidity of 70%, and near the upper corners on the left – the actual beet humidity (in two squares 88%), on the right – chopped wheat straw (14%) and flax chaff (12%).

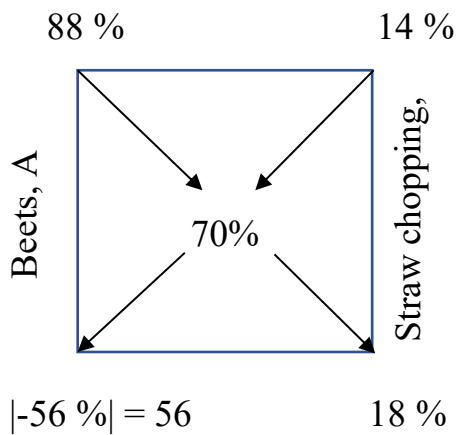
We have:

Component 1: fodder beet, mass A, moisture a (88%), with sugar content  $\alpha$  (5%);

Component 2: chopped wheat straw, mass B, moisture b (14%), with sugar content  $\beta$  (3%);

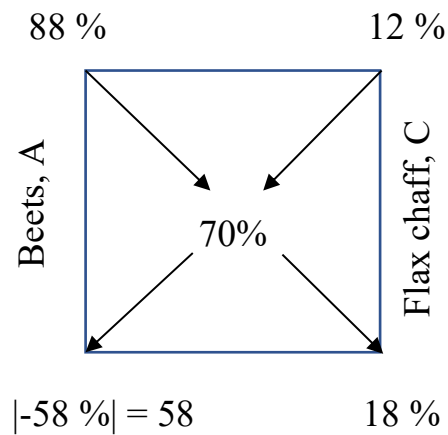
Component 3: flaxseed, mass C, moisture c (12%), with sugar content  $\gamma$  (0.2%).

From the numbers in the upper corners of the square, we subtract the value in the center of the squares diagonally, and the results are displayed in its lower corners.



**Figure 12.** Calculation of the required amount of chopped straw to the amount of beets to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 13.** Calculation of the required amount of flax chaff to the amount of beets to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

We will perform the calculations by subtracting according to the arrows of the square, and we will replace the negative numbers with their modules, i.e. A:B=56:18, or we need to take 56 parts of beets and 18 parts of straw. Similarly, we will calculate the ratio of the mass of beets to the mass of chaff: A:C=58:18, that is, we need to take 58 parts of beets and 18 parts of chaff, which means that we should take 56+58=114 parts of beets and 18 parts of chopped straw and flax chaff: A:B:C=114:18:18.

Dividing all terms by 18, we will get the ratio A:B:C=6,3:1:1, that is, for 6,3 centners of beets, we should take 1 centner of chopped straw and flax chaff.

Let's check whether the humidity of the laid mass will be 70% in this case.

6.3 quintals, or 630 kg of beets, with a moisture content of 88%, contain:  $\frac{630 \times 88}{100} = 554,4$  kg of water;

1 quintal of chopped straw with a moisture content of 14% contains:  $\frac{100 \times 14}{100} =$

14 kg of water;

1 quintal of flaxseed with a moisture content of 12% contains:  $\frac{100 \times 12}{100} =$

12 kg of water.

In total,  $6.3+1+1=8.3$  quintals=830 kg of silage mass from three crops contains  $554.4+14+12=580.4$  kg of water, which is  $\frac{580,4 \times 100}{830} = 69,93 \approx 70 \%$ .

Thus, with a ratio of beets, straw and chaff of 6.3:1:1, the moisture content of the silage mass will be 70%.

Let's calculate the initial sugar content in the silage mass:

6.3 quintals of beets with a sugar content of 5% contain:  $\frac{6,3 \times 5}{100} =$

0,315 quintals of sugar;

1 quintal of chopped straw with a sugar content of 3% contains:  $\frac{1 \times 3}{100} =$

0,03 quintals of sugar;

1 quintal of flaxseed chaff, with a sugar content of 0,2%, contains:  $\frac{1 \times 0,2}{100} =$

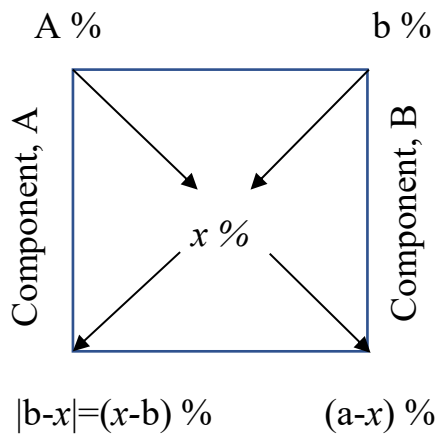
0,002 quintals of sugar;

In total,  $6.3+1+1=8.3$  quintals of silage mass from three crops contains  $0.315+0.03+0.002=0.347$  quintals of sugar, which is  $\frac{100 \times 0,347}{8,3} = 4,2 \%$  sugar, which fully meets the requirements for the initial sugar content in the silage mass for ensiling.

Using Pearson's square (Fig. 14, 15), we derive the formula for calculating the ratio of the amount of each component for laying in silage, depending on their moisture content, for three forage crops. Let's consider the problem in general form between the components of ensiling A:B:C, where component A is the mass of the first component, quintals; a is the moisture content of the first component, %;  $\alpha$  is the sugar content in the first component, %; B is the mass of the second component, quintals; b is the moisture content of the second component, %;  $\beta$  is the sugar content in the second component, %; C is the mass of the third component, quintals; c is the moisture content of the third component, %;  $\gamma$  is the sugar content in the third component, %; x is the

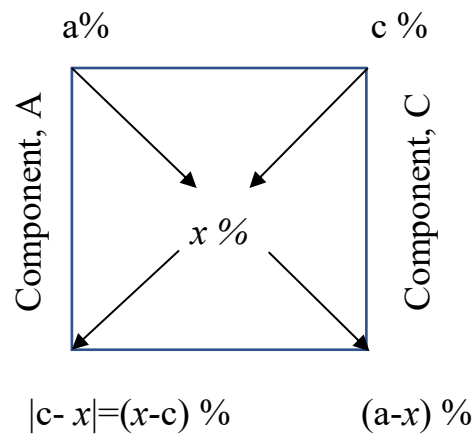
planned moisture content of the resulting mass, %. In component A, the moisture content is the highest – a %.

Near the upper corners of each square on the left, we will write the highest humidity of component A, and on the right, near the upper corners of the squares, the humidity indicators of the components b % and c %. In the center of the squares, we will put the planned humidity of the silage mass  $x$  %.



**Figure 14.** Calculation of the required amount of component B to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 15.** Calculation of the required amount of component C to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

Let's perform standard calculations using the Pearson square method. Since the number  $x$  satisfies the conditions  $a > x > b$  and  $a > x > c$ , then  $a - x > 0$ .

$$b - x < 0, \text{ to } |b - x| = x - b; \quad c - x < 0, \text{ to } |c - x| = x - c;$$

The numbers at the bottom corners of the squares show the ratio of components in the silage mass.

From the first square we have:  $A:B=(x-b):(a-x)$ , that is, to ensile component A with component B, one should take  $(x-b)$  parts of component A and  $(a-x)$  parts of component B for ensiling.

From the second square we have:  $A:C=(x-c):(a-x)$ , that is, to ensile component A with component C, one should take  $(a-x)$  parts of component C and  $(x-c)$  parts of component A.

Therefore, to ensile components A and B together with component C, one should take  $(a-x)$  parts of component C,  $(a-x)$  parts of component B, and component A in the silage mass will be  $(x-b)+(x-c)=(2x-b-c)$  parts. So, we have the formula for the ratio between components A:B:C, depending on the humidity indicators a, b and c, where a is the highest indicator:

$$A : B : C = (2x - b - c) : (a - x) : (a - x); \quad (8)$$

From equalities  $A:B=(2x-b-c):(a-x)$  та  $A:C=(2x-b-c):(a-x)$  we have:

$$\begin{cases} A(a-x) = B(2x-b-c) \\ A(a-x) = C(2x-b-c) \end{cases} \quad \begin{cases} Aa-Ax=2Bx-Bb-Bc \\ Aa-Ax=2Cx-Cb-Cc \end{cases}$$

Let's perform term-by-term addition of equalities:

$$2Aa-2Ax=2x(B+C)-b(B+C)-c(B+C).$$

We move the terms with  $x$  to one side, and without  $x$  to the other:

$$2Aa+b(B+C)+c(B+C)=2Ax+2x(B+C),$$

$2Aa+(B+C) \times (b+c) = 2x(A+B+C)$ , hence the formula for calculating the moisture content of a three-component silage mass,  $x\%$ :

$$x = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}; \quad (9)$$

where A, B, C are the mass of the silage components;

a, b, c are the percentage moisture of components A, B, C and c is the highest value of the numbers a %, b %, c %.

From the relations  $A:C=(2x-b-c):(a-x)$  and  $A:B=(2x-b-c):(a-x)$  we have the formula for the dependence of components B and C on component A:

$$B = C = \frac{A(a-x)}{2x-b-c}; \quad (10)$$

where A, B, C are the mass of the silage components;

a, b, c are the percentage moisture of components A, B, C and c is the highest value of the numbers a %, b %, c %.

Let us check the effectiveness of the derived formulas (8) and (9) under the conditions of example 5, namely: it is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beets with a moisture content of 88% and a sugar content of 5% should be ensiled with chopped wheat straw with a moisture content of 14% and a sugar content of 3% and flax chaff with a moisture content of 12% and a sugar content of 0.2% to obtain a mass with a moisture content of 70% and what will be the initial sugar content in the silage mass. The highest moisture content is fodder beets, 88%, denoted by  $a=88\%$ , then the mass of beets will be A.

We have:

Component 1: fodder beet, mass A, humidity a (88%);

Component 2: chopped wheat straw, mass B, humidity b (14%);

Component 3: flaxseed, mass C, humidity c (12%).

Then, using formula 8, we perform the calculations:

$A : B : C = (2x - b - c) : (a - x) : (a - x)$ , where a is the highest humidity index.

$A : B : C = (2 \times 70 - 14 - 12) : (88 - 70) : (88 - 70) = 6,3 : 1 : 1$ , that is, you need to take 6.3 parts (6.3 qt) of beets, 1 part each of chopped straw and flax chaff (1 qt).  $C=1$ ;  $B=1$ ;  $A=6,3$ .

Let's determine the moisture content of the silage mass using formula 9:

$x = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}$ , where a is the highest humidity index.

$$X = \frac{(1+1) \times (14+12) + 2 \times 6,3 \times 88}{2 \times (1+1+6,3)} = \frac{52+1108,8}{2 \times 8,3} = \frac{1160,8}{16,6} = 69,93 \approx 70 \%$$

Therefore, the results of the calculations coincide both by the Pearson square method and by the derived formulas, which indicates their efficiency.

Thus, to calculate the ratio of components in the silage mass, depending on their humidity, we obtained formula 5:

$A : B : C = (x - c) : (x - c) : (a + b - 2x)$ , where among the humidity indicators a, b and c, c is the lowest indicator, as well as formula 8:

$A: B: C = (2x - b - c): (a - x): (a - x)$ , where among the humidity indicators  $a$ ,  $b$  and  $c$ ,  $a$  is the highest indicator.

We will determine the moisture content of the silage mass using the previously derived formulas 6:  $x = \frac{(A+B) \times (a+b) + 2Cc}{2(A+B+C)}$ , where among the humidity indicators  $a$ ,  $b$  and  $c$ ,  $a$  is the lowest indicator and 9:  $x = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}$ , where among the humidity indices  $a$ ,  $b$  and  $c$ ,  $a$  is the highest index.

Let's find out in which case which formulas should be used.

Let the components of the silage mass  $A$ ,  $B$  and  $C$  have a humidity of  $a$  %,  $b$  % and  $c$  %, respectively, and the planned humidity of the mixture of components is  $x$  %.

Having placed the indicators  $a$  %,  $b$  %,  $c$  % and  $x$  in descending order, from the highest to the lowest and if the indicator  $x$  is next to the lowest indicator, that is,  $x$  satisfies the inequality:  $a > b > \underline{x} > c$ , then in the calculations we will use formulas 5 – the ratio of components in the silage mass and 6 – the humidity of the silage mass.

$$A: B: C = (x - c): (x - c): (a + b - 2x); \quad (5)$$

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + 2Cc}{2(A+B+C)}; \quad (6)$$

where  $A$ ,  $B$ ,  $C$  are the mass of the silage components;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  are the percentage moisture of components  $A$ ,  $B$ ,  $C$  and  $c$  is the lowest value of the numbers  $a$  %,  $b$  %,  $c$  %.

If in the descending order of the indices  $a$ %,  $b$ %,  $c$ % and  $x$ , the index  $x$ % - the planned humidity of the silage mass is next to the highest humidity index, i.e.  $x$  satisfies the inequality:  $\underline{c} > x > a > b$ , then in the calculations we will use formulas 8 – the ratio of components in the silage mass and 9 – the planned humidity of the silage mass.

$$A: B: C = (2x - b - c): (a - x): (a - x); \quad (8)$$

$$x = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}; \quad (9)$$

where  $A$ ,  $B$ ,  $C$  are the mass of the silage components;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  are the percentage moisture of components  $A$ ,  $B$ ,  $C$  and  $a$  is the highest value of the numbers  $a$  %,  $b$  %,  $c$  %.

To check the moisture content of the silage mass, we derive the general formula:

Let A, B, C be the volume of the silage mass components, expressed in parts;

a, b, c be the percentage moisture content of components A, B, C.

Component A, with a humidity of a %, contains  $\frac{A \times a \%}{100 \%}$  parts of water, component B, humidity of b %, contains  $\frac{B \times b \%}{100 \%}$  parts of water and component C, with a humidity of c%, contains  $\frac{C \times c \%}{100 \%}$  parts of water. Silage mass with a volume of (A+B+C) parts contains:

$\frac{A \times a \%}{100 \%} + \frac{B \times b \%}{100 \%} + \frac{C \times c \%}{100 \%} = \frac{Aa+Bb+Cc}{100}$  parts of water, which constitutes  $\frac{Aa+Bb+Cc}{100}$  (A+B+C)×100% =  $\frac{Aa+Bb+Cc}{A+B+C}$  %. Hence the formula for silage moisture:

$$x = \frac{Aa+Bb+Cc}{A+B+C} \% \quad (11)$$

Let us consider the application of the derived formulas in two examples 5 and 6.

**Example 5.** It is necessary to determine in what ratio a mixture of milk-ripe corn, with a moisture content of 80%, with a sugar content of 2.53%, with waxy beans, with a moisture content of 74%, with a sugar content of 2.8%, and barley straw, with a moisture content of 14%, with a sugar content of 0.7%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what the initial sugar content in the silage mass will be.

We have:

Component 1: corn of milk ripeness, mass A, humidity a (80%), with sugar content  $\alpha$  (2.53%);

Component 2: waxy beans, mass B, humidity b (74%), with sugar content  $\beta$  (2.8%);

Component 3: barley straw, mass C, humidity c (14%), with sugar content  $\gamma$  (0.7%).

The humidity of the silage components and the humidity of the silage mass will be placed in descending order of 80%, 74%, **70%, 14%**. The humidity of the silage mass  $x=70\%$  is next to the lowest indicator of 14%, i.e. x satisfies the inequality:  $a > b > \underline{x} > c$ , then in the calculations we will use formulas 5 and 6, where c% is the lowest indicator of the numbers a%, b%, c%.

We will find the ratio between the components according to formula 5:

$$A : B : C = (x - c) : (x - c) : (a + b - 2x); \quad (5)$$

$$A: B: C = (70 - 14): (70 - 14): (80 + 74 - 2 \times 70) = 56: 56: 14 = 4: 4: 1.$$

So, the ratio A:B:C=4:4:1, that is, for ensiling you should take 1 part of straw and 4 parts of corn and beans, or 1 centner of straw and 4 centners of corn and beans: A=4; B=4; C=1.

Let's check the moisture content of the silage mass using formula 6 for this ratio of components:

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + 2Cc}{2(A+B+C)} = \frac{(4+4) \times (80+74) + 2 \times 1 \times 14}{2(4+4+1)} = \frac{1232+28}{18} = \frac{1260}{18} = 70 \%$$

Thus, for a ratio of 1 part straw and 4 parts corn and beans, we will obtain a silage mass of the planned humidity – 70%, which indicates the effectiveness of the derived formula 6 – calculation of the humidity of the three-component silage mass, x %.

We will determine the humidity of the silage mass in another way, using formula 11:

$$x = \frac{Aa+Bb+Cc}{A+B+C}; \quad (11)$$

where A, B, C – volume of silage components, expressed in parts;

a %, b %, c% – percentage moisture of components A, B, C.

We have: A=4 parts, B=4 parts, C=1 part, a=80 %, b=74 %, c=14 %.

$$\text{Then } x = \frac{4 \times 80 + 4 \times 74 + 1 \times 14}{4 + 4 + 1} = \frac{320 + 296 + 14}{9} = \frac{630}{9} = 70 \%$$

Thus, both methods of checking the moisture content of silage confirm the correctness of the calculations of the ratio of silage components.

**Example 6:** It is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beet, with a moisture content of 85%, with a sugar content of 3.46%, with oat straw, with a moisture content of 14%, with a sugar content of 0.12% and wheat straw, with a moisture content of 16%, with a sugar content of 0.07%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what the initial sugar content in the silage mass will be.

The humidity of the silage components and the humidity of the silage mass will be placed in descending order from the highest to the lowest: **85%, 70%**, 16%, 14%. The humidity of the silage mass  $x=70\%$  is next to the highest indicator of 85% and

satisfies the inequality  $\underline{a} > x > v > a$ , therefore, in the calculations we will use formulas 8 and 9.

$$A : B : C = (2x - b - c) : (a - x) : (a - x), \quad (8)$$

where A, B, C are the mass of the silage components;

a, b, c are the percentage moisture content of components A, B, C, and a is the highest of the numbers a %, b %, c %.

$A : B : C = (2 \times 70 - 16 - 14) : (85 - 70) : (85 - 70) = 110 : 15 : 15 = 22 : 3 : 3$ , that is, for ensiling, you should take components B and C (oat and wheat straw) in 3 parts (for example, 3 quintals each), and component A (fodder beets) in 22 parts (22 quintals):  $A=22, B=3, C=3$ .

Let's check whether the humidity of the silage mass will be 70% with this ratio.

Let's use the correspondingly derived formula 9 for calculations:

$$x = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}; \quad (9)$$

where A, B, C are the mass of the silage components;

a, b, c are the percentage humidity of components A, B, C and a (85%) is the highest of the numbers a %, b %, c %.

$$X = \frac{(3+3) \times (16+14) + 2 \times 22 \times 85}{2 \times (22+3+3)} = \frac{6 \times 30 + 3740}{2 \times 28} = \frac{3920}{56} = 70 \%$$

Indeed, the humidity of the silage mass for the ratio of components  $A=22, B=3, C=3$  will be 70%.

Let's determine the humidity of the silage mass in another way, using formula 11:

$$x = \frac{Aa+Bb+Cc}{A+B+C},$$

where A, B, C are the mass of the silage components, expressed in parts or quintals;

a %, b %, c% are the percentage moisture of components A, B, C.

We have:  $B=3$  parts,  $C=3$  parts,  $A=22$  parts,  $c=14\%$ ,  $b=16\%$ ,  $a=85\%$ .

$$\text{Then } x = \frac{3 \times 14 + 3 \times 16 + 22 \times 85}{3 + 3 + 22} = \frac{42 + 48 + 1870}{28} = \frac{1960}{28} = 70 \%$$

Let's calculate the initial sugar content in the starting raw material for this ratio of components.

22 quintals of beets, with a sugar content of 3,46%, contain  $\frac{22 \times 3,46}{100} = 0,7612$  quintals=76,12 kg of sugar;

3 quintals of oat straw, with a sugar content of 0,12%, contains  $\frac{3 \times 0,12}{100} = 0,0036$  quintals=0,36 kg of sugar;

3 quintals of wheat straw, with a sugar content of 0,07%, contains  $\frac{3 \times 0,07}{100} = 0,0021$  quintals=0,21 kg of sugar.

In total, 22+3+3=28 quintals = 2800 kg of silage mass from three crops contains 76,12+0,36+0,21=76.69 kg of sugar, which is  $\frac{100 \times 76,69}{2800} = 2,74$  % sugar, which fully meets the requirements for sugar content in silage for ensiling.

As a result of calculations of the planned moisture content of the silage mass, both using the derived formulas 6 and 9 in both examples, and using the general formula 11 – calculation of the moisture content of the silage mass, we obtained the same results, which confirms the correctness of the calculations of the ratio of components in the silage mass, depending on their moisture content.

Let's check the effectiveness of the derived formulas for a different planned moisture content for a three-component silage mass in example 7.

**Example 7:** It is necessary to determine in what ratio a mixture of milk-wax corn, moisture content 90%, with a sugar content of 2.52%, with chopped wheat straw, moisture content 16%, with a sugar content of 0.4% and flax chaff, moisture content 14%, with a sugar content of 0.2%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 60% and what will be the initial sugar content in the silage mass.

The indicators characterizing the moisture content of the components will be placed in descending order, starting from the largest to the smallest, naming them with the letters a=90%, b=16%, c=14%, and x=60% - the initial planned moisture content of the silage mass.

We have the inequality  $\underline{a} > x > b > c$ , and accordingly the mass of the components will be A parts, B parts and C parts.

We find the ratio of the components by formula 8:

$$A: B: C = (2x - b - c): (a - x): (a - x); \quad (8)$$

$$A: B: C = (2 \times 60 - 16 - 14): (90 - 60): (90 - 60) = 90: 30: 30 = 3: 1: 1.$$

Therefore, components B and C (straw and chaff) are 1 part each, and component A (corn of milky-wax ripeness) is 3 parts, i.e. A=3, B=1, C=1, or A=3 centners, B=1 centner, C=1 centner.

Let's check whether the humidity of the silage mass with this ratio of components will be 60% according to formula 9.

$$X = \frac{(B+C) \times (b+c) + 2Aa}{2(A+B+C)}; \quad (9)$$

$$x = \frac{(1 + 1) \times (16 + 14) + 2 \times 3 \times 90}{2(3 + 1 + 1)} = \frac{60 + 540}{10} = \frac{600}{10} = 60 \%$$

Indeed, the moisture content of the silage mass with the ratio of components A=3, B=1, C=1 will be 60%.

Let's calculate the moisture content of the silage mass using the general formula 11.

$$X = \frac{Aa + Bb + Cc}{A + B + C} \%; \quad (11)$$

$$x = \frac{3 \times 90 + 1 \times 16 + 1 \times 14}{3 + 1 + 1} = \frac{300}{5} = 60\%.$$

Thus, calculations of silage moisture content using two different formulas 9 and 11 confirm the correctness of the found ratio of components in silage.

Let us determine the sugar content in the initial raw material in a logical way:

In 3 quintals = 300 kg of corn, with a sugar content of 2,52%, there is  $\frac{300 \times 2,52}{100} = 7,56$  kg of sugar;

1 quintal = 100 kg of wheat straw with a sugar content of 0,4% contains  $\frac{100 \times 0,4}{100} = 0,4$  kg of sugar;

1 quintal = 100 kg of flaxseed, with a sugar content of 0,2%, contains  $\frac{100 \times 0,2}{100} = 0,2$  kg of sugar;

In total,  $300+100+100=500$  kg of silage mass from three crops contains  $7,56+0,4+0,2=8,16$  kg of sugar, which is  $\frac{100 \times 8,16}{500} = 1,6$  % sugar, which fully meets the requirements for sugar content in silage for ensiling.

Let us derive the formulas for calculating the dependence of the mass of three components for ensiling on the mass of the component with the lowest humidity.

Let A be the mass of the first component, quintals; a is the humidity of the first component, %; B is the mass of the second component, quintals; b is the humidity of the second component, %; C is the mass of the third component, quintals; c is the humidity of the third component, %; x is the planned humidity of the resulting mass, %.

Let's consider the case when  $a \% > x \% > b \% > c \%$ .

We calculate the ratio of components using formula 8.

$$A : B : C = (2x - b - c) : (a - x) : (a - x);$$

Hence the formula for the dependence of the mass of components A and B on component C:

$$B=C; A=\frac{C \times (2x-b-c)}{a-x}; \quad (12)$$

Let's consider the case when  $a \% > b \% > x \% > c \%$ .

We calculate the ratio of components using formula 5.

$$A : B : C = (x - c) : (x - c) : (a + b - 2x)$$

Hence the formula for the dependence of the mass of components A and B on component C:

$$A=B=\frac{C \times (x-c)}{a+b-2x}; \quad (13)$$

Let's check the effectiveness of the derived formulas using examples 8 and 9.

**Example 8:** We have three components for ensiling with humidity of 75%, 80%, 15%. What mass should be taken of the components to obtain a mixture with humidity of 65%.

We will place the humidity indicators in descending order and denote them as  $a=80\%$ ,  $b=75\%$ ,  $c=15\%$ , where  $a > b > c$ , and their masses are A, B and C, respectively.

The indicator of the planned humidity of the silage mass  $x=65\%$  satisfies the inequality  $a>b>x>c$ . Let's assume the mass of component  $C=1$  centner and use formula 13:

$$A=B=\frac{C \times (x-c)}{a+b-2x};$$

$A=B=\frac{1 \times (65-15)}{80+75-2 \times 65} = \frac{50}{25} = 2$  centners. Therefore, for every 1 centner of component C for ensiling, 2 centners of components A and B should be taken.

**Example 9:** We have three components for ensiling with humidity of 85%, 75%, 15%. What mass of components should be taken to obtain a mixture with humidity of 60%.

We will place the humidity indicators in descending order and denote them as  $a=85\%$ ,  $b=75\%$ ,  $c=15\%$ , where  $a>b>c$ , and their masses are A, B and C, respectively. The planned moisture content of the silage mass  $x=60\%$  satisfies the inequality  $a>b>x>c$ .

Let's assume the mass of component  $C=1$  centner and use formula 13:

$$A=B=\frac{C \times (x-c)}{a+b-2x}; \quad (13)$$

$A=B=\frac{1 \times (60-15)}{85+75-2 \times 60} = \frac{45}{40} = 1,1$  centner. Therefore, for every 1 centner of component C for ensiling, 1.1 centners of components A and B should be taken.

Let's calculate similar indicators for a silage mass consisting of 4 components in example 10.

**Example 10:** It is necessary to determine in what ratio a mixture of fodder beet, with a moisture content of 90%, with alfalfa, with a moisture content of 60%, with chopped oat straw, with a moisture content of 14%, and chaff, with a moisture content of 12%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 70% and what will be the initial sugar content in the silage mass.

For calculations, we will use the "Pearson square" method. We draw three squares (Fig. 16, 17, 18), in the center of which we put the planned silage moisture of 70%, and near the upper left corners – the actual moisture content of fodder beet (in three squares 90%), and near the upper right corners – the actual moisture content of alfalfa (60%), chopped straw (14%) and chaff (12%).

We have:

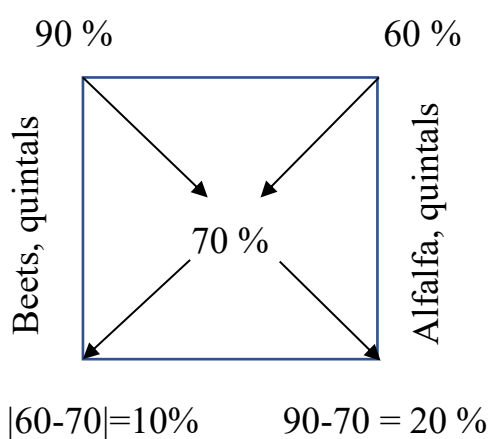
Component 1: fodder beet, mass A, moisture a (90%);

Component 2: alfalfa, mass B, moisture b (60%);

Component 3: chopped straw, mass C, moisture c (14%);

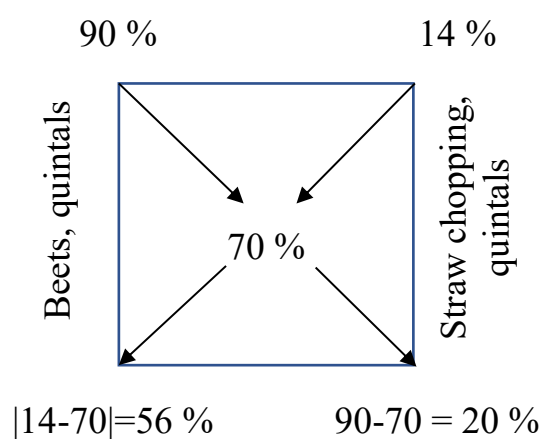
Component 4: field oats, mass D, moisture d (12%).

Near the upper corners of each square on the left, write the highest moisture content of component A ( $a\% = 90\%$ ), and on the right, near the upper corners of the squares, the moisture content of components  $b\%$  (60%),  $c\%$  (14%), and  $d\%$  (12%). In the center of the squares, write the planned moisture content of the silage mass  $x\%$ .



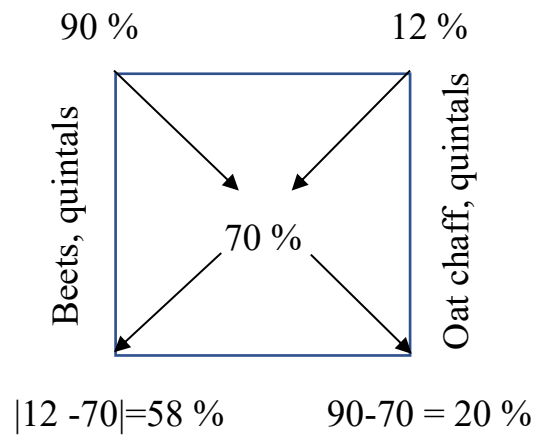
**Figure 16.** Calculation of the required amount of alfalfa to the amount of beets to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 17.** Calculation of the required amount of chopped straw to the amount of beets to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 18.** Calculation of the required amount of oat chaff to the amount of beets to obtain a mixture of planned moisture content using the Pearson square method  
 Source of the figure: developed by the authors.

We will perform standard calculations by subtracting according to the arrows of the square, and we will write the results near their lower corners, replacing negative numbers with their modules.

Component A (beetroot) should contain  $10 + 56 + 58 = 124$  parts, and components B, C and D (alfalfa, chopped straw and oat chaff) 20 parts each, i.e.  $A:B:C:D = 124:20:20:20 = 6.2:1:1:1$ , i.e. we should take 6.2 centners of beetroot and 1 centner of alfalfa, chopped straw and oat chaff.

We will determine the moisture content of the silage mass with this ratio of components.

6.2 quintals of beets with a moisture content of 90% contain:  $\frac{6,2 \times 90}{100} = 5,58$  quintals of water;

1 quintal of alfalfa with a moisture content of 60% contains:  $\frac{1 \times 60}{100} = 0,6$  quintals of water;

1 quintal of chopped straw with a moisture content of 14% contains:  $\frac{1 \times 14}{100} = 0,14$  quintals of water;

1 quintal of oat chaff with a moisture content of 12% contains:  $\frac{1 \times 12}{100} = 0,12$  quintals of water;

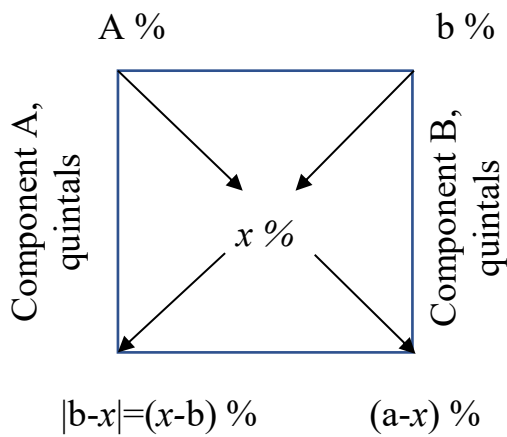
In total,  $6.2+1+1+1=9.2$  quintals of silage mass, which consists of four components, contains  $5.58+0.6+0.14+0.12=6.44$  quintals of water, which is  $\frac{6,44 \times 100}{9,2} = 70\%$ .

Thus, for a ratio of beets, alfalfa, chopped straw and oat chaff 6.2:1:1:1, the humidity of the silage mass will be 70%.

Using Pearson's square (Fig. 19, 20, 21), we derive a formula for calculating the ratio of the amount of each component for laying in silage, depending on their humidity, for four forage crops. Let's consider the problem in general form between the components of ensiling A:B:C:D, where component A is the mass of the first component, quintals; a is the humidity of the first component, %; B is the mass of the second component, quintals; b is the humidity of the second component, C is the mass of the third component, quintals; c is the humidity of the third component, %; D is the mass of the fourth component, quintals; d is the humidity of the fourth component, %; x is the planned humidity of the resulting mass, %. In component A, the humidity indicator is the highest – a %, therefore  $a > b > c > d$ .

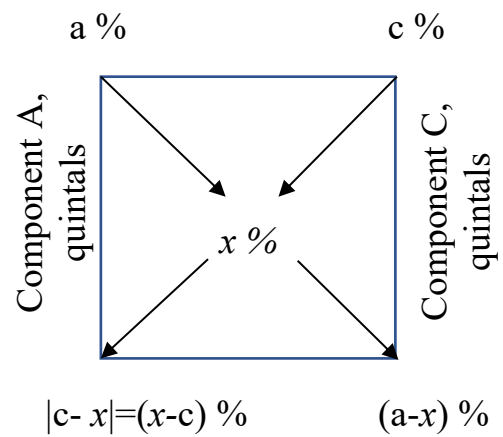
Let us consider the case when the planned silage moisture content (x%) is between the moisture content of components A and B:  $a \% > x \% > b \%$ , that is, the case  $a \% > x \% > b \% > c \% > d \%$ .

Near the upper corners of each square on the left, write the highest humidity of component A, and on the right, near the upper corners of the squares, the humidity indicators of components a %, b % and d %. In the center of the squares, write the planned humidity of the silage mass x %.



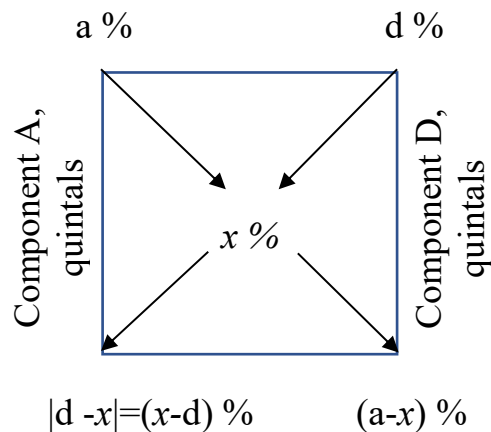
**Figure 19.** Calculation of the required amount of component B to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 20.** Calculation of the required amount of component C to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 21.** Calculation of the required amount of component D to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

We will perform standard calculations by subtracting according to the arrows of the square, and we will write the results near their lower corners, replacing negative numbers with their modules.

Component A will contain  $x-b+x-c+x-d=3x-b-c-d$  parts, components B, C and D by  $(a-x)$  parts, hence we have the formula for calculating the ratio of components in the silage mass, depending on their humidity:

$$A: B: C: D = (3x - b - c - d): (a - x): (a - x): (a - x); \quad (14)$$

Let's express  $x$  in terms of A, B, C, D and a, b, c, d. From proportions:

$$A:B=(3x-b-c-d):(a-x);$$

$$A:C=(3x-b-c-d):(a-x);$$

$$A:D=(3x-b-c-d):(a-x).$$

$$\text{Маємо: } \begin{cases} A \times (a-x) = B \times (3x-b-c-d); \\ A \times (a-x) = C \times (3x-b-c-d); \\ A \times (a-x) = D \times (3x-b-c-d). \end{cases}$$

Розкриємо дужки і виконаємо почленне додавання рівностей:

$$\begin{cases} Aa - Ax = 3Bx - Bb - Bc - Bd; \\ Aa - Ax = 3Cx - Cb - Cc - Cd; \\ Aa - Ax = 3Dx - Db - Dc - Dd. \end{cases}$$

$$\text{Звідси: } 3Aa - 3Ax = 3x(B+C+D) - b(B+C+D) - c(B+C+D) - d(B+C+D);$$

$3Aa - 3Ax = 3x(B+C+D) - (B+C+D) \times (b+c+d)$ . Доданки з  $x$  перенесемо в ліву частину, без  $x$  – в праву частину рівняння:

$-3Ax - 3x(B+C+D) = -3Aa - (B+C+D) \times (b+c+d)$ . Домножимо всі доданки на «-1» і отримаємо:  $3Ax + 3x(B+C+D) = 3Aa + (B+C+D) \times (b+c+d)$ ;

$3x(A+B+C+D) = (B+C+D) \times (b+c+d) + 3Aa$ , звідси формула розрахунку вологості силосної маси, залежно від маси компонентів A, B, C, D та їх вологості, де  $a\%$  – найвищий з показників  $a\%$ ,  $b\%$ ,  $c\%$ ,  $d\%$ :

$$x = \frac{(B+C+D) \times (b+c+d) + 3Aa}{3(A+B+C+D)}; \quad (15)$$

Let us consider the effectiveness of the derived formulas if  $a=90\%$ ,  $b=60\%$ ,  $c=14\%$ ,  $d=12\%$ , and the planned humidity of the silage mass  $x=70\%$ .

Let us calculate the ratio of components in the silage mass, depending on their humidity, using formula 14:

$$A: B: C: D = (3x - b - c - d): (a - x): (a - x): (a - x); \quad (14)$$

$$A: B: C: D = (3 \times 70 - 60 - 14 - 12): (90 - 70): (90 - 70): (90 - 70) =$$

124: 20: 20: 20 = 6,2: 1: 1: 1, that is, for ensiling, you should take 6.2 parts (6.2 quintals) of the component with the highest moisture content and 1 part (1 quintal) of the other components: A=6,2, B=1, C=1, D=1.

We calculate the moisture content of the silage mass, depending on the mass of components A, B, C, D and their moisture content, using formula 15:

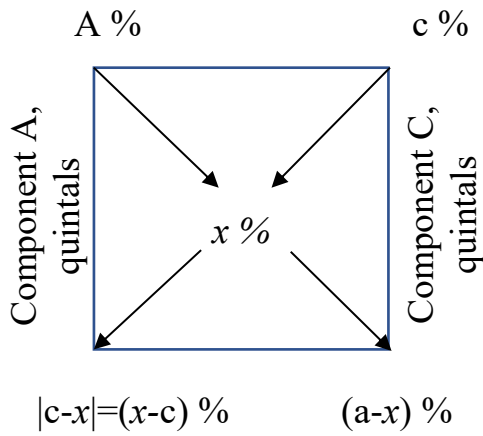
$$x = \frac{(B+C+D) \times (b+c+d) + 3Aa}{3(A+B+C+D)}; \quad (15)$$

$$x = \frac{(1+1+1) \times (60+14+12) + 3 \times 6,2 \times 90}{3(6,2+1+1+1)} = \frac{3 \times 86 + 1674}{3 \times 9,2} = \frac{1932}{27,6} = 70 \%, \text{ therefore, the moisture}$$

content of the four-component silage mass will indeed correspond to the planned moisture content of 70%, which indicates the workability of the derived formulas.

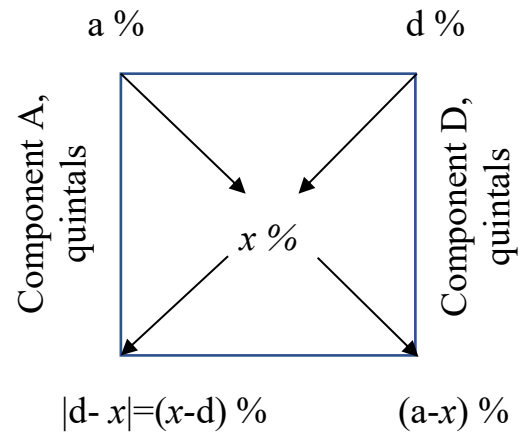
Consider the case  $a > b > x > c > d$ , for example  $a=90\%$ ,  $b=82\%$ ,  $c=30\%$ ,  $d=22\%$  - humidity of four components A, B, C, D. For ensiling respectively. X% - planned humidity of silage mass (70%).

We will perform calculations in general form using the Pearson square method (Fig. 22, 23, 24, 25). The planned humidity of silage mass – x% cannot be between the humidity indicators of components a% and b%, since they are higher than x%, so we will write them near the upper left corners of the squares, and near the upper right corners we will write the humidity indicators c% and d%.



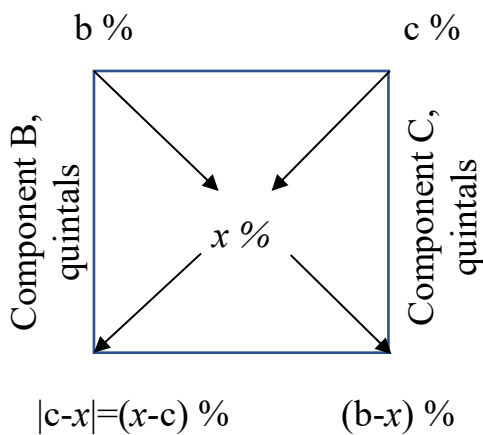
**Figure 22.** Calculation of the required amount of component C to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



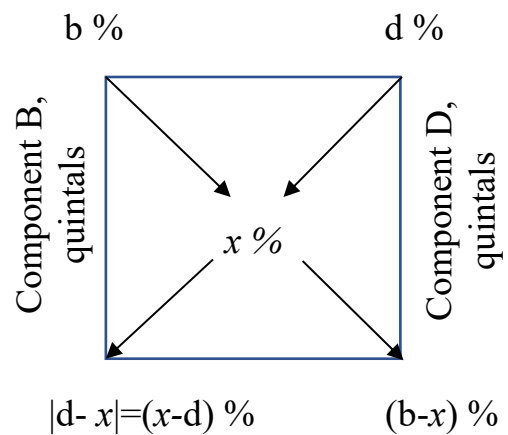
**Figure 23.** Calculation of the required amount of component D to the amount of component A to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 24.** Calculation of the required amount of component C to the amount of component B to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 25.** Calculation of the required amount of component D to the amount of component B to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

For calculations, we obtained four squares, in the center of which we placed the planned humidity of the silage mass –  $x$  %. We will perform the calculations by subtracting the squares according to the arrows, replacing negative numbers with their modules. The numbers obtained near the lower corners of the squares show how many parts of each component should be taken for ensiling, depending on their humidity, to obtain the planned humidity of the silage mass.

Component A is:  $(x-c)+(x-d)=2x-c-d$  parts;

Component B is:  $(x-c)+(x-d)=2x-c-d$  parts;

Component C is:  $(a-x)+(b-x)=a+b-2x$  parts;

Component D is:  $(a-x)+(b-x)=a+b-2x$  parts.

Let's derive the formula for the ratio of components in the silage mass, depending on their humidity:

$$A : B : C : D = (2x - c - d) : (2x - c - d) : (a + b - 2x) : (a + b - 2x); \quad (16)$$

From the obtained relations we have the equalities:

$$\left[ \begin{array}{l} A:C=(2x-c-d):(a+b-2x); \\ A:D=(2x-c-d):(a+b-2x); \\ B:C=(2x-c-d):(a+b-2x); \\ B:D=(2x-c-d):(a+b-2x); \end{array} \right. \left[ \begin{array}{l} A \times (a+b-2x) = C \times (2x-c-d); \\ A \times (a+b-2x) = D \times (2x-c-d); \\ B \times (a+b-2x) = C \times (2x-c-d); \\ B \times (a+b-2x) = D \times (2x-c-d); \end{array} \right.$$

$$\left[ \begin{array}{l} Aa+Ab-2Ax=2Cx-Cc-Cd; \\ Aa+Ab-2Ax=2Dx-Dc-Dd; \\ Ba+Bb-2Bx=2Cx-Cc-Cd; \\ Ba+Bb-2Bx=2Dx-Dc-Dd; \end{array} \right.$$

Let's perform term-by-term addition of equalities:

$$2Aa+2Ba+2Ab+2Bb-4Ax-4Bx=4Cx+4Dx-2Cc-2Dc-2Cd-2Dd.$$

We divide all terms by 2:

$$Aa+Ab+Ba+Bb+Cc+Cd+Dc+Dd=2Ax+2Bx+2Cx+2Dx;$$

$$A \times (a+b) + B \times (a+b) + C \times (c+d) + D \times (c+d) = 2x \times (A+B+C+D);$$

$$(A+B) \times (a+b) + (C+D) \times (c+d) = 2x \times (A+B+C+D);$$

From here we obtain the formula for calculating the moisture content of the silage mass, depending on the moisture content of the components:

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + (C+D) \times (c+d)}{2 \times (A+B+C+D)}; \quad (17)$$

Let us consider the efficiency of the derived formulas 13 and 14, if the humidity of the components  $a=90\%$ ,  $b=82\%$ ,  $c=30\%$ ,  $d=22\%$ . In what ratio should each component be taken so that the humidity of the mixture is 70%.

Let us calculate the ratio of the components of the silage mass at such a humidity of each component according to formula 16:

$$A : B : C : D = (2x - c - d) : (2x - c - d) : (a + b - 2x) : (a + b - 2x); \quad (16)$$

$$A : B : C : D = (2 \times 70 - 30 - 22) : (2 \times 70 - 30 - 22) : (90 + 82 - 2 \times 70) : (90 + 82 - 2 \times 70);$$

$A : B : C : D = 88 : 88 : 32 : 32$ . Reducing the ratio by 8, we get:

$A : B : C : D = 11 : 11 : 4 : 4$ , that is, for ensiling, you should take 11 parts of components A and B (for example, 11 quintals each), and 4 parts of components C and D (4 quintals each).

Let's calculate the moisture content of the silage mass for this ratio of components using formula 17:

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + (C+D) \times (c+d)}{2 \times (A+B+C+D)}; \quad (17)$$

$$x = \frac{(11+11) \times (90+82) + (4+4) \times (30+22)}{2 \times (11+11+4+4)} = \frac{22 \times 172 + 8 \times 52}{60} = \frac{4200}{60} = 70 \%, \text{ indeed, for}$$

the ratio of components  $A:B:C:D=11:11:4:4$ , the moisture content of the silage mass will be 70%, which indicates the efficiency of the derived formulas.

Let's calculate the moisture content of the silage mass logically, without using formula 15.

1 quintals of component A, with a humidity of  $a=90\%$ , contains:  $\frac{11 \times 90}{100} = 9,9$  quintals of water;

11 quintals of component B, with a humidity of  $b=82\%$ , contains:  $\frac{11 \times 82}{100} = 9,02$  quintals of water;

4 quintals of component C, with a humidity of  $c=30\%$ , contains:  $\frac{4 \times 30}{100} = 1,2$  quintals of water;

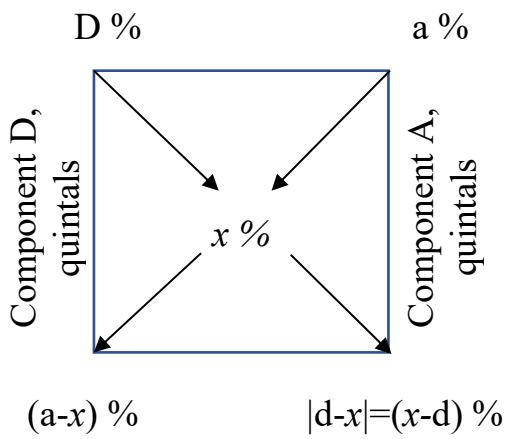
4 quintals of component D, with a humidity of  $d=22\%$ , contains:  $\frac{4 \times 22}{100} = 0,88$  quintals of water.

In total,  $11+11+4+4=30$  quintals of silage mass, which consists of four components, contains  $9,9+9,02+1,2+0,88=21$  quintals of water, what constitutes  $\frac{21 \times 100}{30} = 70\%$ .

Thus, with a ratio of components  $A:B:C:D=11:11:4:4$ , the moisture content of the silage mass will be 70%.

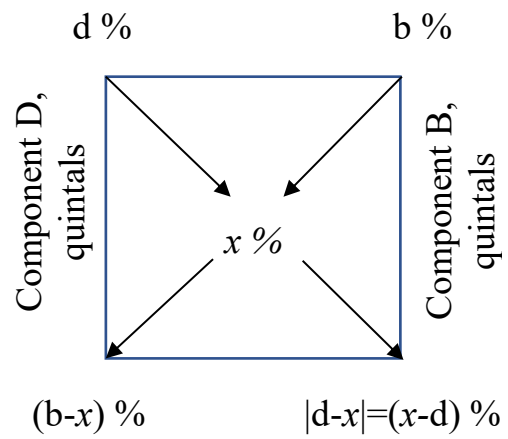
Consider the case  $a>b>c>x>d$ , for example  $a=90\%$ ,  $b=80\%$ ,  $c=75\%$ ,  $d=20\%$  - the humidity of the four components A, B, C, D. For ensiling, respectively.  $X\%$  - the planned humidity of the silage mass (70%).

We will perform the calculations in general form, using the Pearson square method (Fig. 26, 27, 28). The planned humidity of the silage mass –  $x\%$  cannot be between any of the pairs  $a\%$  and  $b\%$ ,  $a\%$  and  $c\%$ ,  $b\%$  and  $c\%$ , since they are higher than  $x\%$ , therefore we will write them near the upper right corners of the squares, and near the upper left corners we will write the humidity indicator  $d\%$ , and in the center we will put the planned humidity of the silage mass –  $x\%$ .



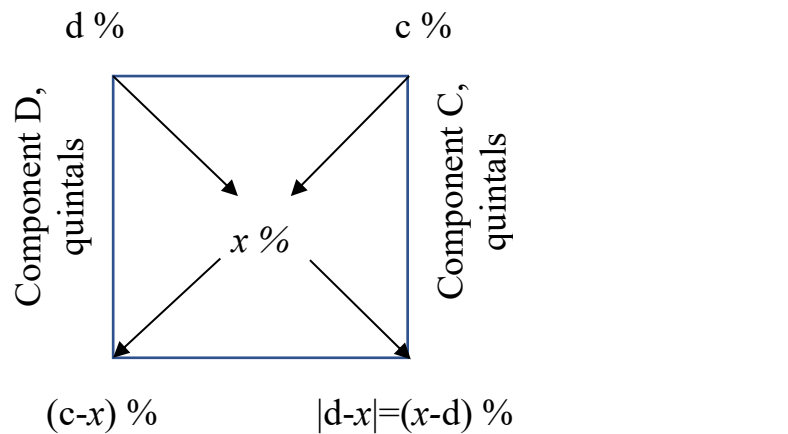
**Figure 26.** Calculation of the required amount of component A to the amount of component D to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 27.** Calculation of the required amount of component B to the amount of component D to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.



**Figure 28.** Calculation of the required amount of component C to the amount of component D to obtain a mixture of the planned moisture content using the Pearson square method

Source of the figure: developed by the authors.

The calculations are performed by subtracting the squares according to the arrows, replacing the negative numbers with their modules. The numbers obtained at the lower corners of the squares show how many parts of each component should be taken for ensiling, depending on their moisture content, to obtain the planned moisture content of the silage mass.

Component D is:  $(a-x)+(b-x)+(c-x)=a+b+c-3x$  parts;

Components A, B, C make up  $(x-d)$  parts each.

We obtain the formula for the ratio of components in the silage mass, depending on their humidity:

$$A: B: C: D = (x - d): (x - d): (x - d): (a + b + c - 3x); \quad (18)$$

From the obtained relations we have the equalities:

$$\left[ \begin{array}{l} A:D=(x-d):(a+b+c-3x); \\ B:D=(x-d):(a+b+c-3x); \\ C:D=(x-d):(a+b+c-3x); \end{array} \right. \left[ \begin{array}{l} A \times (a+b+c-3x) = D \times (x-d); \\ B \times (a+b+c-3x) = D \times (x-d); \\ C \times (a+b+c-3x) = D \times (x-d); \end{array} \right.$$

$$\left[ \begin{array}{l} Aa+Ab+Ac-3Ax=Dx-Dd; \\ Ba+Bb+Bc-3Bx= Dx-Dd; \\ Ca+Cb+Cc-3Cx= Dx-Dd; \end{array} \right.$$

Let's perform term-by-term addition of equalities:

$$a \times (A+B+C) + b \times (A+B+C) + c \times (A+B+C) - 3x \times (A+B+C) = 3Dx - 3Dd;$$

$$(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd = 3x \times (A+B+C) + 3Dx;$$

$$(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd = 3x \times (A+B+C+D).$$

From here we obtain the formula for calculating the moisture content of the silage mass, depending on the moisture content of the components, where  $d$  is the lowest moisture content among the indicators  $a$  %,  $b$  %,  $c$  %,  $d$  %:

$$x = \frac{(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd}{3 \times (A+B+C+D)}; \quad (19)$$

Let us consider the performance of the derived formulas 16 and 17, if the humidity of the components  $a=90\%$ ,  $b=80\%$ ,  $c=75\%$ ,  $d=20\%$ . In what ratio should each component be taken so that the humidity of the mixture is 70%.

Let's calculate the ratio of silage mass components at such a humidity of each component using formula 18:

$$A: B: C: D = (x - d): (x - d): (x - d) \textcircled{\ominus} a + b + c - 3x); \quad (18)$$

$$A: B: C: D = (70 - 20): (70 - 20): (70 - 20) \textcircled{\ominus} 90 + 80 + 75 - 3 \times 70);$$

A: B: C: D=50:50:50:35. Reducing the ratio by 5, we get: A:B:C:D=10:10:10:7, that is, for ensiling, components A, B and C should be taken in 10 parts (for example, 10 quintals each), and component D – 7 parts (7 quintals).

We calculate the moisture content of the silage mass for this ratio of components using formula 19:

$$x = \frac{(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd}{3 \times (A+B+C+D)}; \quad (19)$$

$$x = \frac{(10+10+10) \times (90+80+75) + 3 \times 7 \times 20}{3 \times (10+10+10+7)} = \frac{30 \times 245 + 420}{111} = \frac{7770}{111} = 70 \%, \text{ indeed, for}$$

the ratio of components A:B:C:D=10:10:10:7, the moisture content of the silage mass will be 70%, which indicates the efficiency of the derived formulas.

Let's calculate the moisture content of the silage mass logically, without using formula 16.

10 quintals of component A, with a humidity of a=90%, contains:  $\frac{10 \times 90}{100} = 9$  quintals of water;

10 quintals of component B, with a humidity of b=80%, contains:  $\frac{10 \times 80}{100} = 8$  quintals of water;

10 quintals of component C, with a humidity of c=75%, contains:  $\frac{10 \times 75}{100} = 7,5$  quintals of water;

7 quintals of component D, with a humidity of d=20%, contains:  $\frac{7 \times 20}{100} = 1,4$  quintals of water;

In total, 10+10+10+7=30 quintals of silage mass, which consists of four components, contains 9+8+7.5+1.4=25.9 water, which is  $\frac{25,9 \times 100}{37} = 70 \%$ .

Therefore, with a ratio of components A:B:C:D=10:10:10:7, the moisture content of the silage mass will be 70%.

Thus, using the calculations to find the ratio between the four components for ensiling and finding the moisture content of the silage mass, we obtained three pairs of formulas and will explain in which cases they should be used.

Having four indicators that show the moisture content of the four components for ensiling, we will place these indicators in descending order from the largest to the smallest and denote them by the letters a, b, c and d, where  $a > b > c > d$ .

Among the four indicators a, b, c and d, written in descending order, one of them a is always the highest, and the other d is the lowest. Which of them should be taken as the highest in the calculation and in which case the moisture indicator d should be taken as the lowest?

If the indicator  $x$ , which is the planned moisture content of the silage mass, cannot be between the indicators b and c, c and d (between the pairs of the smallest numbers), then there remains the option when the number  $x$  is between the indicators a and b, and therefore we have the case  $a > x > b > c > d$ , and a is next to  $x$ , then in the calculations you should take the indicator a – as the highest among the indicators a, b, c and d and use formulas 14 and 15:

$$A: B: C: D = (3x - b - c - d): (a - x): (a - x): (a - x); \quad (14)$$

$$x = \frac{(B+C+D) \times (b+c+d) + 3Aa}{3(A+B+C+D)}; \quad (15)$$

If  $x$  cannot be between the pairs a and b, b and c (between the pairs of the highest indices), then the case remains when the value of  $x$  is between the indices c and d ( $c > x > d$ ). If we have the case  $a > b > c > x > d$ , where d is the lowest humidity index among the indices a %, b %, c %, d % and is next to  $x$ , then we should take the index d as the lowest and use formulas 18 and 19:

$$A: B: C: D = (x - d): (x - d): (x - d): (a + b + c - 3x); \quad (18)$$

$$x = \frac{(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd}{3 \times (A+B+C+D)}, \quad (19)$$

where d is the lowest indicator among the humidity indicators a %, b %, c %, d %. If  $x$  is between the two highest indicators and the two lowest indicators, we get the option –  $a > b > x > c > d$ , for which you should use formula 16 – the ratio of components

in the silage mass, depending on their humidity and 17 – calculation of the humidity of the silage mass, depending on the humidity of the components

$$A: B: C: D = (2x - c - d): (2x - c - d): (a + b - 2x): (a + b - 2x); \quad (16)$$

$$x = \frac{(A+B) \times (a+b) + (C+D) \times (c+d)}{2 \times (A+B+C+D)}; \quad (18)$$

The derived formulas in all three cases:  $a > x > b > c > d$ ,  $a > b > x > c > d$  and  $a > v > c > x > d$  simplify the calculations of the ratio of the 4 components, depending on their moisture content, to obtain the planned moisture content of the silage mass.

Let us derive the general formula for calculating the moisture content of silage mass from four components. Let A be the mass of the first component, quintals; a is the moisture content of the first component, %; B is the mass of the second component, quintals; b is the moisture content of the second component, %; C is the mass of the third component, quintals; c is the moisture content of the third component, %; D is the mass of the fourth component, quintals; d is the moisture content of the fourth component, %; x is the planned moisture content of the resulting mass, %.

Then component A contains  $x = \frac{A \times a \%}{100 \%}$  water, component B contains  $x = \frac{B \times b \%}{100 \%}$  water, component C contains  $x = \frac{C \times c \%}{100 \%}$  water, component D contains  $x = \frac{D \times d \%}{100 \%}$  water.

Together, the mixture of components A+B+C+D contains

$$\frac{A \times a}{100} + \frac{B \times b}{100} + \frac{C \times c}{100} + \frac{D \times d}{100} = \frac{Aa + Bb + Cc + Dd}{100} \text{ water, what constitutes}$$

$$\frac{Aa + Bb + Cc + Dd}{100} : (A + B + C + D) \times 100 = \frac{Aa + Bb + Cc + Dd}{A + B + C + D}.$$

So, we have a general formula for calculating the moisture content of silage mass from four components, depending on the moisture content of each component:

$$x = \frac{Aa + Bb + Cc + Dd}{A + B + C + D}; \quad (20)$$

Let us check the effectiveness of the derived formulas at different planned moisture content for a four-component silage mass using example 9.

**Example 9:** It is necessary to determine in what ratio a mixture of 4 components, with a moisture content of 80%, 75%, 70%, and 15%, should be ensiled to obtain a mass with a moisture content of 65%.

The indicators characterizing the moisture content of the components and the planned moisture content of the silage mass  $x=65\%$  will be placed in descending order, starting from the largest to the smallest, calling them by the letters  $a=80\%$ ,  $b=75\%$ ,  $c=70\%$ ,  $x=60\%$ ,  $d=15\%$ .

We have the inequality  $a>b>c>\underline{x}>d$ , and accordingly the mass of the components will be A parts, B parts, C parts and D parts.

We find the ratio of components using formula 18:

$$A : B : C : D = (x - d) : (x - d) : (x - d) : (a + b + c - 3x); \quad (18)$$

$$A : B : C : D = (65 - 15) : (65 - 15) : (65 - 15) : (80 + 75 + 70 - 3 \times 65) = 50 : 50 : 50 : 30 = 5 : 5 : 5 : 3.$$

So, components A, B and C are 1 part each, and component D is 3 parts, i.e.  $A=5$ ,  $B=5$ ,  $C=5$ ,  $D=3$ .

Let's check whether the humidity of the silage mass with this ratio of components will be 65% according to formula 19:

$$x = \frac{(A+B+C) \times (a+b+c) + 3Dd}{3 \times (A+B+C+D)}; \quad (19)$$

$$x = \frac{(5+5+5) \times (80+75+70) + 3 \times 3 \times 15}{3 \times (5+5+5+3)} = \frac{15 \times 225 + 9 \times 15}{3 \times 18} = \frac{3375 + 135}{54} = \frac{3510}{54} = 65 \%$$

Indeed, the humidity of the silage mass with the ratio of components  $A=5$ ,  $B=5$ ,  $C=5$ ,  $D=3$  will be 65%.

Let's check the humidity of the silage mass using the general formula 20.

$$X = \frac{Aa+Bb+Cc+Dd}{A+B+C+D}; \quad (20)$$

$$x = \frac{5 \times 80 + 5 \times 75 + 5 \times 70 + 3 \times 15}{5+5+5+3} = \frac{5 \times 80 + 5 \times 75 + 5 \times 70 + 3 \times 15}{5+5+5+3} = \frac{400+375+350+45}{18} = \frac{1170}{18} = 65 \%$$

Both formulas for calculating the moisture content of the silage mass confirmed the correctness of the found ratio of the components of the silage mass.

Let us derive formulas for calculating the dependence of the mass of the four components for ensiling on the mass of the component with the lowest moisture content.

Let A be the mass of the first component, quintals; a is the moisture content of the first component, %; B is the mass of the second component, quintals; b is the moisture content of the second component, %; C is the mass of the third component, quintals; c is the moisture content of the third component, %; D is the mass of the fourth component, quintals; d is the moisture content of the fourth component, %; x is the planned moisture content of the resulting mass, %.

Consider the case when  $a \% > x \% > b \% > c \% > d \%$ .

We calculate the ratio of components using formula 14.

$$A: B: C: D = (3x - b - c - d): (a - x): (a - x): (a - x); \quad (14)$$

Hence the formula for the dependence of the mass of components A, B and C on component D:

$$B=C= D; A=\frac{D \times (3x-b-c-d)}{a-x}; \quad (21)$$

Let's consider the case when  $a \% > b \% > x \% > c \% > d \%$ .

We calculate the ratio of components using the formula 16.

$$A: B: C: D = (2x - c - d): (2x - c - d): (a + b - 2x): (a + b - 2x); \quad (16)$$

Because  $A: D = (2x - c - d): (a + b - 2x)$

$$B: D = (2x - c - d): (a + b - 2x)$$

Hence the formula for the dependence of the mass of components A, B and C on component D:

$$C = D; A=B= \frac{D \times (2x-c-d)}{a+b-2x}; \quad (22)$$

Let's consider the case when  $a \% > b \% > c \% > x \% > d \%$ .

We calculate the ratio of components using formula 18.

$$A: B: C: D = (x - d): (x - d): (x - d): (a + b + c - 3x);$$

Hence the formula for the dependence of the mass of components A, B and C on component D:

$$A=B=C = \frac{D \times (x-d)}{a+b+c-3x}; \quad (23)$$

Let's check the effectiveness of the derived formulas using examples 11, 12, and 13.

**Example 11:** We have four components for ensiling with humidity of 80%, 75%, 15%, 25%. What mass should be taken to obtain a mixture with humidity of 65%.

We will place the humidity indicators in descending order and denote them as  $a=80\%$ ,  $b=75\%$ ,  $x=65\%$ ,  $c=25\%$ ,  $d=15\%$ , and their masses, respectively, A, B, C and D. The planned humidity indicator of the silage mass  $x=65\%$  satisfies the inequality  $a>b>x>c>d$ .

Let's assume the mass of component D = 1 centner, then C=D=1 centner and use formula 22:

$$A=B = \frac{D \times (2x - c - d)}{a + b - 2x}; \quad (22)$$

$A=B = \frac{1 \times (2 \times 65 - 25 - 15)}{80 + 75 - 2 \times 65} = \frac{90}{25} = 3,6$  centners. Therefore, for ensiling, you should take 1 centner of components C and D and 3.6 centners of components A and B.

**Example 12:** We have four components for ensiling with humidity of 86%, 15%, 20%, 14%. What mass should be taken of the components to obtain a mixture with humidity of 70%.

We will place the humidity indicators in descending order and denote them as  $a=86\%$ ,  $x=70\%$ ,  $b=20\%$ ,  $c=15\%$ ,  $d=14\%$ , and their masses, respectively, A, B, C and D. The planned humidity indicator of the silage mass  $x=70\%$  satisfies the inequality  $a>x>b>c>d$ . We will assume the mass of the component D = 1 centner, then B=C=D=1 centner and use formula 21:

$$B=C=D; A = \frac{D \times (3x - b - c - d)}{a - x}; \quad (21)$$

$A = \frac{1 \times (3 \times 70 - 20 - 15 - 14)}{86 - 70} = \frac{161}{16} = 10,1$  centners. Therefore, for ensiling, you should take 1 centner each of components B, C and D and 10.1 centners of component A.

**Example 13:** We have four components for ensiling with humidity of 86%, 76%, 70%, 15%. What mass should be taken of the components to obtain a mixture with humidity of 65%.

We will place the humidity indicators in descending order and denote them as  $a=86\%$ ,  $b=76\%$ ,  $c=70\%$ ,  $x=65\%$ ,  $d=15\%$ , and their masses, respectively, A, B, C and D. The indicator of the planned humidity of the silage mass  $x=70\%$  satisfies the

inequality  $a > b > c > x > d$ . Let us assume the mass of the component D = 1 centimeter and use formula 23:

$$A=B=C = \frac{D \times (x-d)}{a+b+c-3x}; \quad (23)$$

$A=B=C = \frac{1 \times (65-15)}{86+76+70-3 \times 65} = \frac{50}{37} \approx 1,4$  centners. Therefore, for ensiling, you should take 1.4 centners of components A, B and C for every 1 centner of component D.

For ease of use of the derived formulas, we will enter them into summary tables: for calculating the ratio of two-component silage mass and calculating the planned moisture content (Table 1), for calculating the ratio of three-component silage mass and calculating the planned moisture content (Table 2), and for calculating the ratio of four-component silage mass and calculating the planned moisture content (Table 3).

**Table 1.** Summary table of formulas for calculating the ratio of two-component silage mass and calculating the planned moisture content

Relationship between components. Dependence on the component with the lowest moisture content	Silage moisture
$a > x > b$	
$A : B = (b - x) : (x - a);$  $A = \frac{B \times (x - b)}{a - x}.$	$x = \frac{A \times a + B \times b}{A + B}.$
where: A, B – mass of components, parts (centimeters); a, b – moisture content of components, %; x – planned moisture content of the resulting mass, %.	

**Table 2.** Summary table of formulas for calculating the ratio of three-component silage mass and calculating the planned moisture content

Relationship between components. Dependence on the component with the lowest moisture content	Silage moisture
$a > x > b > c$	
$A : B : C = (2x - b - c) : (a - x) : (a - x);$  $B = C; A = \frac{C \times (2x - b - c)}{a - x}.$	$x = \frac{(B + C) \times (b + c) + 2Aa}{2(A + B + C)}.$
$a > b > x > c$	
$A : B : C = (x - c) : (x - c) : (a + b - 2x);$  $A = B = \frac{C \times (x - c)}{a + b - 2x}.$	$x = \frac{(A + B) \times (a + b) + 2Cc}{2(A + B + C)}.$
<b>General formula</b>	
$x = \frac{Aa + Bb + Cc}{A + B + C}$	
where: A, B, C – mass of components, parts (centimeters); a, b, c – moisture content of components, %; x – planned moisture content of the resulting mass, %.	

**Table 3.** Summary table of formulas for calculating the ratio of four-component silage mass and calculating the planned moisture content

Relationship between components. Dependence on the component with the lowest moisture content	Silage moisture
$a > x > b > c > d$	
$A : B : C : D = (3x - b - c - d) :$ $(a - x) : (a - x) : (a - x) ;$ $B = C = D ; A = \frac{D \times (3x - b - c - d)}{a - x}.$	$x = \frac{(B + C + D) \times (b + c + d) + 3Aa}{3(A + B + C + D)}.$
$a > b > x > c > d$	
$A : B : C : D = (2x - c - d) : (2x - c - d) :$ $(a + b - 2x) : (a + b - 2x) ;$ $C : D ; A = B = \frac{D \times (2x - c - d)}{a + b - 2x}.$	$x = \frac{(A + B) \times (a + b) + (C + D) \times (c + d)}{2(A + B + C + D)}.$
$a > b > c > x > d$	
$A : B : C : D = (x - d) : (x - d) :$ $(x - d) : (a + b + c - 3x) ;$ $A = B = C = \frac{D \times (x - d)}{a + b + c - 3x}.$	$x = \frac{(A + B + C) \times (a + b + c) + 3Dd}{3(A + B + C + D)}.$
<b>General formula</b>	
$x = \frac{Aa + Bb + Cc + Dd}{A + B + C + D}.$	
where: A, B, C, D – mass of components, parts (centners); a, b, c, d – moisture content of components, %; x – planned moisture content of the resulting mass, %.	

The results obtained coincide, both through calculations using the Pearson square method, logical verification, and through the derived formulas, which indicates their workability, and therefore can be recommended for use in farms during the preparation of two-component silage mass to simplify calculations.

This paper examines examples of ensiling too wet components, to which dry ones are added to obtain a mixture that would correspond to the planned moisture content of the silage mass, but there are other factors that affect the quality of ensiling, such as the ratio between the sugar minimum and the actual sugar content in it, and it is also necessary to take into account the sugar-protein ratio and the sugar:buffer capacity ratio, which is what our further research consists of.

## REFERENCES

1. Степаненко І. Агросектор України зазнав понад 74 млрд євро збитків через війну та втратив 20% угідь.  
URL: <https://agroweek.com/agroekonomika/agrosektor-ukrayiny-zaznav-ponad-mlrd>
2. Вінюков О. О., Коноваленко Л. І., Бондарева О. Б. Вплив добрив на вміст важких металів у ґрунті та їх накопичення рослинами ячменю ярого. Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України. 2016. № 10. С. 129–133.
3. Gorash O., Klymyshena R., Khomina V., Vilchynska L. Ecological and biological conformity of conditions of the brewing barley cultivation zone. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 10 (1). P. 246–253. [https://doi.org/10.15421/2020\\_39](https://doi.org/10.15421/2020_39).
4. Пивовар П. В., Данкевич В. Є. Сучасний стан та перспективи запровадження екологічно безпечних технологій землеробства. Органічне виробництво і продовольча безпека. Житомир, 2017. С. 116–120.
5. Вінюков О.О., Бондарева О.Б., Коробова О.М. Екологічна пластичність нових сортів ячменю ярого до стресових факторів. Селекція і насінництво. 2016. С. 29–33
6. Petrychenko V. F., Korniychuk O. V., Voronetska I. S. Biological farming in conditions of transformational changes in the agrarian production of Ukraine. *Agricultural Science and Practice*. 2018. Vol. 5 No. 2. P. 3–12.  
<https://doi.org/10.15407/agrisp5.02.003>
7. Жемела Г. П., Писаренко П. В. Удосконалення технології вирощування екологічно чистого і якісного зерна озимої пшениці. Збірник наукових праць Уманського держ. агр. ун-ту (Спец. випуск. «Біологічні науки і проблеми рослинництва»). 2003. С. 702–707.
8. Шевченко М. С. та ін. Вплив елементів біологізації на продуктивність сівозмін та родючість ґрунту в Степу. Бюлетень сільського господарства НААН України. 2016. № 11. С. 88–96.
9. Думич В., Шкоропад Л. Дослідження ефективності застосування біопрепаратів у технологіях вирощування озимих зернових культур. *Техніка і технології АПК*. 2018. №2. С. 19–22.
10. Дмитришак М. Я., Філь Т. П. Урожайність ячменю ярого залежно від застосування стимуляторів росту. *Агрономія. Наукові доповіді НУБіП України*. 2017. № 4 (68).

11. Ліхушина Г. А., Скнипа Н. Л. Вплив стимуляторів росту рослин та фонів живлення на формування біометричних показників пшениці озимої в умовах східної частини Північного Степу України. *Зернові культури*. 2024. Т. 8. № 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0316>.
12. Крутякова В. І., Гулич О. І., Пилипенко Л. А. Біологічний метод захисту сільськогосподарських культур: перспективи для України. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 11 (788). С. 159–168. DOI:10.31073/agroviznyk201811-20
13. Вінюков О. О., Чугрій Г. А., Поплевко В. І., Шульц П., Скнипа Н. Л. Вплив мікробіологічних препаратів на фізіологічні процеси формування зернової продуктивності пшениці озимої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2022. № 2. С. 11–20. doi: 10.31210/visnyk2022.02.01
14. Власюк О. С. Вплив удобрення на ефективність обробки мікробними препаратами насіння та посівів ячменю ярого. *Зернові культури*. Т. 4. № 1. 2020. С. 80–86. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0109>
15. Пирог Т. П., Палійчук О. І., Іутинська Г. О., Шевчук Т. А. Перспективи використання мікробних поверхнево-активних речовин у рослинництві. *Мікробіол.* 2018. Вип. 80/3. С. 115–135.  
[https://doi.org/10.15407/microbioly\\_80.03.115](https://doi.org/10.15407/microbioly_80.03.115)
16. Вінюков О. О., Чугрій Г. А., Поплевко В. І., Шульц П., Скнипа Н. Л. Вплив мікробіологічних препаратів на фізіологічні процеси формування зернової продуктивності пшениці озимої. *Вісник ПДАА*. 2022. № 2. С. 11–20.  
doi: 10.31210/visnyk2022.02.01
17. Забарна Т. А., Череншук В. В. Агроєкологічні аспекти вирощування сої (*Glycine max L.*) в Україні. *Агроєкологічний журнал*. 2024. № 1. С. 108-116. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299945>
18. Жуйков О. Г., Іванів М. О., Марченко Т. Ю., Возняк В. В. Сучасне виробництво сої як елемент розв'язання проблеми харчового білка: світові тренди та вітчизняні реалії. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 116. Ч. 1. С. 54-63.
19. Бербенець О. В. Світове виробництво сої як невичерпного джерела білків рослинного походження та місце України на світовому ринку торгівлі нею. *Агросвіт*. 2019. № 10. С.41-45.
20. Дідур І. М. Економічна оцінка моделей технології вирощування сої за біологізованої системи живлення. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 2 (29). С. 214-221.
21. Бабич А. О., Бабич-Побережна А. А. Селекція, виробництво, торгівля і використання сої у світі. К. : Аграрна наука, 2011. 548 с.

22. Коробко А. А. Динаміка виробництва сої в Україні та світі. Збалансоване природокористування. 2021. № 4. С. 125-134. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253098>
23. Стрижак А. М. Сучасний стан та перспективи розвитку виробництва насіння сої в Україні. Таврійський науковий вісник. 2018. Вип. 99. С. 141-147.
24. Рослинництво України 2019. Статистичний збірник / за ред. О. Прокопенка. Київ : Державна служба статистики України, 2020. 183 с.
25. Дідур І. М., Голованюк А. Б. Стан та перспективи виробництва сої в Україні. Аграрні інновації. 2025. № 30. С. 193-196. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.30.27>
26. Урожай сої в Україні 2024: рекордна кількість попри зниження врожайності. Агроном. 2024. URL: <https://www.agronom.com.ua/urozhaj-soyi-v-ukrayini-2024-rekordna-kilkist-popry-znyzhennya-vrozhajnosti/>
27. Репілевський Е. В. Економічна ефективність виробництва сої в ринкових умовах господарювання. Наукові праці Полтавської державної аграрної академії. Серія «Економічні науки». 2011. Вип. 2. Т. 2. С. 215-220.
28. Петриченко В. Ф., Бабич А. О., Іванюк С. В., Колісник С. І. Вплив агрокліматичних факторів на продуктивність сої. Вісник аграрної науки. 2006. № 2. С. 19-23.
29. Беляєв О. В. Економічна ефективність зон, придатних для вирощування сої в Україні. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія Фінанси і кредит. 2005. №1 (18). С. 225-229.
30. Вавринович О. В., Качмар О. Й. Вплив сівозмінного фактора на гербологічний стан посівів сої. Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. 2020. Вип. 68 (1). С. 8-21. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2020-\(68\)-1-1](https://doi.org/10.32636/01308521.2020-(68)-1-1)
31. Вплив елементів технології вирощування на продуктивність сої / Ткаченко Л. Ю., Рудавська Н. М., Тимчишин О. Ф. та ін. Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. 2024. Вип. 75 (2). С. 138–146. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(75\)-2-12](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(75)-2-12)
32. Мазур В. А., Гончарук І. В., Панцирева Г. В., Телекало Н. В. Агроекологічне обґрунтування технологічних прийомів вирощування зернобобових культур. Монографія. Вінниця: Твори, 2020. 192 с.
33. Чайка Т. О., Логвиненко В. В., Пшенишний А. А. Вплив систем обробітку ґрунту на врожайність сої. Scientific Progress & Innovations. 2023. № 4. С. 54-59. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.04.10>
34. Расевич В. В., Тетерещенко Н. М. Дія системи основного обробітку ґрунту на агрофізичні показники та урожайність сої. Корми і кормовиробництво. 2023. Вип. 96. С. 72-82. DOI: [10.31073/kormovyrobnytstvo202396-07](https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202396-07)

35. Кирилюк В. П., Кричківський В. М., Ковальчук Н. В. Адаптивна система основного обробітку ґрунту під сою. Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. 2020. Вип. 67 (2). С. 113-123. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2020-\(67\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2020-(67)-2-7)
36. Огурцов Є. М., Міхеев В. Г., Белінський Ю. В., Клименко І. В. Адаптивна технологія вирощування сої у Східному Лісостепу України. Харків: ХНАУ, 2016. 268 с.
37. Войтовик М. В., Панченко О. Б., Примак І. Д., Цюк О. А. Порівняльна оцінка агрофізичних властивостей за різних технологій обробітку ґрунту в сівоzmіні. Наукові доповіді НУБіП України. 2023. № 6 (106). URL: [https://scireports.com.ua/web/uploads/journals\\_pdf/SR\\_Vol.%2019,%20No.%206,%202023.pdf](https://scireports.com.ua/web/uploads/journals_pdf/SR_Vol.%2019,%20No.%206,%202023.pdf)
38. Вожегова Р. А., Малярчук А. С., Котельников Д. І., Резніченко Н. Д. Вплив основного обробітку ґрунту та сидерації на урожайність сої в сівоzmіні на зрошенні півдня України. Таврійський науковий вісник. 2021. № 118. С. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.8>
39. Особливості вирощування сої по технології no-till на 2026. Агроексперт Трейд. 2023. URL: <https://agroexp.com.ua/uk/osobennosti-vyrashchivaniya-soi-po-tehnologii-no-till>
40. Петриченко В. Ф., Колісник С. І., Панасюк О. Я., Єрмолаєв М. М., Хахула В. С. Вплив нульового обробітку ґрунту на його фізичні властивості в правобережному Лісостепу України. Агробіологія. 2013. № 11 (104). С. 183-186.
41. Дідур І. М. Технологічні прийоми вирощування та особливості вегетації сої в умовах Правобережного Лісостепу. Вісник аграрної науки. № 1 (874). С. 40-47. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202601-04>
42. Гангур В.В., Пипко О.С., Прокопів О.О. Продуктивність сої залежно від технології передпосівного обробітку ґрунту та інокулювання. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2021. № 4. С. 80-85. DOI: [10.31210/visnyk2021.04.10](https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.10)
43. Гангур В. В., Рудь В. С. Вплив технології передпосівного обробітку ґрунту на рясність бур'янів у посівах сої. Актуальні напрямки та проблематика у технологіях вирощування продукції рослинництва: матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Полтава, 23 листопада 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. С. 144-146.
44. Господаренко Г. М., Прокопчук І. В., Бойко В. П. Засвоєння основних елементів живлення соєю з ґрунту й добрив. Агрохімія і ґрунтознавство. 2020. № 89. С. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss89-07>

45. Лихочвор В. В., Щербачук В. М., Панасюк Р. М., Панасюк О. В. Вплив систем удобрення на формування врожайності зерна сої. *Агроном*. 2020. URL: <https://www.agronom.com.ua/vplyv-system-udobrennya-na-formuvannya-vrozhajnosti-ta-yakosti-zerna-soyi/>
46. Венглінський М. О., Глущенко М.К., Годинчук Н. В., Хмара Т. І. Роль мікроелементів у живленні рослин та покращенні родючості ґрунтів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Серія: Сільськогосподарські науки. 2014. № 1. С. 73-79. DOI: [https://doi.org/10.32412/2306-5478-\(1\)2014.026](https://doi.org/10.32412/2306-5478-(1)2014.026)
47. Шевніков М. Я. Вплив мікроелементів на продуктивність сої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2006. № 3. С. 21-24.
48. Колісник С. І. Основні технологічні прийоми вирощування сої на насіння. *Корми і кормовиробництво*. 2012. Вип. 71. С. 41-48.
49. Новохацький М., Бондаренко А. Потреба сої в мікродобривах та доцільність їх застосування. *Новітні технології в АПК: дослідження та управління*. 2018. Вип. 22 (36). С. 237-244. DOI: [https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22\(36\)-235-242](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22(36)-235-242)
50. Milenko O., Shevnikov M., Solomon Yu., Rybalchenko A., Shokalo N. Influence of foliar top-dressing on the yield of soybean varieties. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25, no. 4. P. 61–66. DOI: [10.48077/scihor.25\(4\).2022.61-66](https://doi.org/10.48077/scihor.25(4).2022.61-66).
51. Ямковий В. Особливості сучасної системи удобрення сої. *Пропозиція*. 2013. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnohiiyi-vyroshchuvannya/osoblyvosti-suchasnoyi-systemy-udobrennya-soyi>
52. Мельник А. В., Романько Ю. О., Романько А. Ю. Адаптивний потенціал та стресостійкість сучасних сортів сої. *Таврійський науковий вісник*. 2020. Вип. 113. С. 85-91.
53. Мазур В. А., Ткачук О. П., Панцирева Г. В., Верхолюк С. Д. Технологічність, екологічність та продуктивність середньоранньостиглих сортів сої. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2022. Т. 18. № 1 (95). DOI: <http://doi.org/10.31548/dopovidi2022.01.006>  
URL: <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-95-1-2022/tekhnologichnist-ekologichnist-ta-produktivnist-serednorannostiglih-sortiv-soyi>
54. Рибальченко А. М., Сердюк А. Е. Вплив сортових властивостей на формування елементів продуктивності та урожайність сої в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Аграрні інновації*. 2023. № 21. С. 88-92. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.21.13>
55. Рибальченко А. М. Особливості формування сортових ресурсів та урожайності сої в Україні. *Scientific Progress & Innovations*. 2022. № 3. С. 18-25. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.03.02>

56. Ткачук О.П., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Екологічна оцінка середньостиглих і середньопізнньостиглих сортів сої. Сільське господарство та лісівництво. 2022. № 1 (24). С. 5-15. DOI:10.37128/2707-5826-2022-1-1
57. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2026 рік. Київ, 2026. URL: <https://me.gov.ua/view/07352fdf-a1b5-4aa0-a36f-e3341ea3823a>
58. Мазур В. А., Ткачук О. П., Панцирева Г. В., Алексєєв О. О. Сортіві ресурси зернобобових культур в Україні: сучасний стан і перспективи використання. Вінниця: Твори, 2022. 196 с.
59. Сорти: кормові та польові культури. Інститут кормів та сільського господарства Поділля. URL: <https://fri.vin.ua/sorti/>
60. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) : монографія / В. В. Кириченко, С. С. Рябуха, Л. Н. Кобизєва та ін. НААН ; Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Харків, 2016. 400 с.
61. Григорчук Н. Ф., Донцова Ю. І. Колекція сої – джерело вихідного матеріалу для селекції. Науово-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 2015. Вип. 22. С. 63-69.
62. Каталог сортів та гібридів. Інститут олійних культур НААН України. URL: <https://imk.zp.ua/index.php/kataloh-sortiv-ta-hibrydiv>
63. Січкач В. І. Результати та перспективи адаптивної селекції сої. Вісник аграрної науки. 2012. С. 63-67.
64. Січкач В. І. Стратегічні напрями селекції сої за умов зміни клімату. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2012. Вип. 80. Ч. 1. С. 22-30.
65. Бахмат М. І., Прус Л. І., Кравченко В. С. Урожайність та адаптивний потенціал сортів сої в умовах Лісостепу західного. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2017. № 91 (1). С. 250-259.
66. Рибальченко А. М. Адаптивна селекція сої, як фактор екологічно безпечного функціонування агроєкосистем України / Стійкий розвиток сільських територій у контексті реалізації державної екологічної політики та енергозбереження: колективна монографія; за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава: видавництво ПП «Астрая», 2021. С. 97-105.
67. Mazur O., Kupchuk I., Voloshyna O., Matviiets V., Matviiets N., Mazur O. Genetic determination of elements of the soybean yield structure and combining ability of hybridization components. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 2023. № 26 (2). P. 163-178. DOI: <https://doi.org/10.15414/afz.2023.26.02.163-178>
68. Лавриненко Ю. О., Кузьмич В. І., Боровик В. О. Селекція сої на покращення ознак продуктивності та якості в умовах зрошення. Зрошуване землеробство. 2016. Вип. 66. С. 113-115.

69. Korotkova I., Chaika T., Shevnikov M., Liashenko V., Gorbenko O., Rybalchenko A. Assessing the efficiency of bacterial and phytohormonal soybean (*Glycine max* L.) seed treatment under organic farming technology. *Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology*. 2025. Vol. 33 (4). P. 330-341. <https://doi.org/10.35118/apjmbb.2025.033.4.28>
70. Марченко Т. Ю. Прояв гетерозису за ознакою «маса 1000 насінин» у гібридів сої в умовах зрошення півдня України. *Таврійський науковий вісник*. 2012. Вип. 80. С. 114-118.
71. Рибальченко А. М. Прояв ознаки «маса 1000 насінин» у генотипів сої в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник*. 2018. Вип. 103. С. 112-117.
72. Дідора В. Г. Симбіотична продуктивність сої залежно від інокуляції насіння та удобрення. *Наукові горизонти*. 2018. № 21 (1). С. 23-28. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(75\)-2-12](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(75)-2-12)
73. Сергієнко В. Г., Титова Л. В. Вплив бактеріальних препаратів на розвиток і продуктивність сої. *Агробізнес сьогодні*. 2021. URL: <https://agrobusiness.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/20247-vplyv-bakterialnykhpreparativ-na-rozvytok-i-produktyvnist-soi.html>
74. Чайка Т. О., Ляшенко В. В., Хоменко Б. С. Вплив іннокуляції насіння на врожайність сої за органічної технології вирощування. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 180-187. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.24>
75. Каленська С. М., Новицька Н. В., Джемесюк О. В. Формування площі листової поверхні сої під впливом інокуляції та підживлення. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 3. С. 6-10.
76. Марущак О. Вирощування сої з інокулянтами. *Агроном*. 2013. № 1. С. 152-153.
77. Panchyshyn V., Moisiienko V., Kotelnytska A., Tymoshchuk T., Stotska S. Formation of narrow-leaved lupine productivity depending on seed inoculation and fertilization. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26. № 1. P. 31-42. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.26\(1\).2023.31-42](https://doi.org/10.48077/scihor.26(1).2023.31-42)
78. Поліщук С. В., Ляска В. І. Стійкість сортів сої до хвороб в умовах природного і штучного зараження рослин. *Селекція і насінництво*. 2013. Вип. 103. С. 291-296. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2013.54136>
79. Молдован В. Г., Молдован Ж. А. Тривалість вегетаційного періоду, фаз росту та розвитку сої залежно від строків сівби. *Корми і кормовиробництво*. 2021. Вип. 92. С. 72-81.

80. Шовкова О. В., Шевніков М. Я., Міленко О. Г. Особливості формування насінневої продуктивності рослинами сої залежно від елементів технології вирощування. Наукові доповіді НУБіП України. 2020. № 2 (84). DOI: 10.31548/dopovidi2020.02.015 URL: <https://scireports.com.ua/web/uploads/pdf/Vol.%2084,%20No.%202,%202020-167-175.pdf>
81. Кобак С., Колісник С., Чорна В. Соя: норма висіву, густина рослин і ширина міжрядь. Агробізнес сьогодні. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/19933-soia-norma-vysivu-hustota-roslyn-i-shyryna-mizhriad.html>
82. Андрусик П. Р., Цюк О. А. Водоспоживання сої залежно від ширини міжрядь і норми висіву. Таврійський науковий вісник. 2023. № 134. Ч. 1. С. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.134.1>
83. Заєць С. О., Нетіс В. І. Вплив ширини міжрядь і норми висіву на продуктивність нових сортів сої в умовах зрошення. Зрошуване землеробство. 2014. Вип. 61. С. 46-50.
84. Лемешик А. В., Новицька Н. В. Формування врожайності та якості насіння сортів сої залежно від площі живлення в Правобережному Лісостепу України. Новітні агротехнології. 2024. Вип. 12 (2). DOI: <https://doi.org/10.47414/na.12.2.2024.304338>
85. Лотиш І. І. Формування площі листової поверхні посівів сої залежно від сорту, способу сівби та норми висіву в умовах недостатнього зволоження Лісостепу. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2017. № 1-2. С. 167-171.
86. Міхеєв В. Г. Урожайність сортів сої різних груп стиглості залежно від погодних умов року та різних норм висіву в східній частині лісостепу України. Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. 2013. Вип. 14. С. 95-100.
87. Сенік І. І. Вплив норми висіву та ширини міжрядь на урожайність сої в умовах Лісостепу Західного. Plant and soil science. 2020. Вип. 11. № 3. С. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2020.03.043>
88. Грабовський М. Б., Мостипан О. В., Панченко Т. В., Павліченко К. В. Вплив ґрунтових і післясходових гербіцидів на забур'яненість сої. Агроном. 2026. URL: <https://www.agronom.com.ua/vplyv-gruntovyh-i-pislyashodovyh-gerbitsydiv-na-zabur-yanenist-soyi/>
89. Щербачук В. М. Формування урожайності та якісних показників зерна сої залежно від системи захисту посівів проти бур'янів та хвороб в умовах достатнього зволоження. Агробіологія. 2015. № 1. С. 88-91.
90. Мостипан О. В., Грабовський М. Б. Вплив гербіцидів на формування урожайності зерна та якісних показників сортів сої. Таврійський науковий вісник. 2023. Вип. 132. С. 132-141. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.132.17>

91. Landau C. A., Hager A. G., Williams M. M. Deteriorating weed control and variable weather portends greater soybean yield losses in the future. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 830. Article 154764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154764>
92. Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні на 2026 рік. Київ, 2026. URL: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/>
93. Рибальченко А. М. Методи селекції сої на стійкість до збудників основних хвороб. Сучасні аспекти і технології у захисті рослин: матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Полтава, 16 лютого 2021 р.). Полтава: ПДАА, 2021. С. 65-68.
94. Панфілова А. В., Тарабріна А.-М. О. Фітопатологічний стан ґрунту та розвиток хвороб сої залежно від технології вирощування в умовах Північного Степу України. *Аграрні інновації*. 2024. № 28. С. 85-91. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.28.13>
95. Шугурова Н. О., Дударева Г. Ф., Григорчук Н. Ф. Оцінка стійкості сої до основних грибних та бактеріальних хвороб. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2012. № 17. С. 82-85.
96. Рибальченко А. М., Ісаков Р. Р. Оцінка стійкості до хвороб, урожайності та якості насіння сучасних сортів сої. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (4). С. 57-64. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.04.08>
97. Мазур В. А., Ткачук О. П., Панцирева Г. В., Купчук І. М. Соя в інтенсивному землеробстві. Вінниця: Нілан-ЛТД, 2022. 220 с.
98. Петренкова В. П., Кобизєва Л. Н., Адаменко О. П., Кучеренко Є. Ю., Звягінцева А. М. Стійкість сої до грибів роду *Fusarium* link. Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. 120 с.
99. Писаренко В. М., Писаренко П. В. Захист рослин: екологічно обґрунтовані структури. Полтава: Видавництво «ІнтерГрафіка», 2002. 288 с.
100. Поспелова Г. Д., Коваленко Н. П., Нечипоренко Н. І., Кочерга В. Я., Гречкосій А.О., Скляр С.С. Фунгіцидний захист посівів сої від кореневих гнилей. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. № 26 (3). С. 5-10. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.03.01>
101. Hosseini, B., Voegelé, R.T., & Link, T.I. Diagnosis of soybean diseases caused by fungal and oomycete pathogens: existing methods and new developments. *Journal of Fungi*. 2023. Vol. 9. № 5. P. 587. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9050587>
102. Holiachuk, Y., Kosylovych, H. & Ivaniuk, V. (2025). Effectiveness of pre-sowing fungicide treatment of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) seeds. *Acta Agronomica*. 2025. Vol. 73. № 2. P. 158-166. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v73n2.116342>

103. Рибальченко А. М. Найбільш активні шкідники на соєвих полях в Україні. Сучасний рух науки: тези доповідей X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Дніпро, 2-3 квітня 2020 р.). Дніпро, 2020. Т. 2. С. 313-317.
104. Ткачова С. В. Захист посівів сої від шкідників. Агробізнес сьогодні. 2012. № 12(235). С. 28.
105. Ідентифікація ознак зернобобових культур(горох, соя): навчальний посібник / В. В. Кириченко, Л. Н. Кобизєва, В. П. Петренкова, В. К. Рябчун, О. М. Безугла, Т. Ю. Маркова. За ред. В. В. Кириченка. Харків: ІР ім. В.Я. Юр'єва, 2009. 172 с.
106. Методичні рекомендації з обліку чисельності шкідників і розповсюдженості хвороб у посівах зернобобових культур / Т. В. Сокол, В. П. Петренкова, І. Ю. Боровська, І. М. Ниска. Харків, 2015. 68 с.
107. Основи селекції польових культур на стійкість до шкідливих організмів: навчальний посібник. За ред. В. В. Кириченка та В. В. Петренкової / Ін-т рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН. Харків, 2012. 320 с.
108. Мазур В. А., Гончарук І. В., Дідур І. М., Панцирева Г. В., Телекало Н. В., Купчук І. М. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур: монографія. Вінниця: Нілан-ЛТД, 2021. 180 с.
109. Чернишенко П.В., Рябуха С.С., Шелякін В.О. Передзбиральна десикація – важливий елемент технології вирощування в насінництві сої. Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. 2013. Вип. 14. С. 143-152.
110. Гень С. П. Врожайність і структура врожаю сої залежно від елементів технології вирощування. Передгірне та гірське землеробство і тваринництво. 2022. 71 (2). С. 100-111. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2022-\(71\)-2-7](https://doi.org/10.32636/01308521.2022-(71)-2-7)
111. Рибальченко А. М. Особливості зберігання насіння сої. Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Умань, 7 квітня 2020 р.). Умань: УНУС. 2020. С. 75-78.
112. Марченко В., Гузь В. Зберігання зерна олійних культур. Agroexpert. 2016. Вип. 3 (92). URL: <https://agroexpert.ua/zberiganna-zerna-oliinih-kultur/>
113. Banister D. The sustainable mobility paradigm. Transport Policy. 2008. Vol. 15(2). P. 73–80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2007.10.005.
114. Hickman R., Hall P., Banister D. Planning more for sustainable mobility. Journal of Transport Geography. 2013. Vol. 33. P. 210–219. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.07.004.
115. Schipper L., Fulton L. Making urban transit systems sustainable around the world: manybirds with one bus? Transportation Research Record. 2002. Vol. 1791(1). P. 44–50. DOI: 10.3141/1791-07.

116. Zahabi S. A. H., Miranda-Moreno L. F., Patterson Z., Barla P. Urban transportation greenhouse gas emissions and their link with urban form, transit accessibility, and emerging green technologies. *Transportation Research Record*. 2013. Vol. 2375(1). P. 45–54. DOI: 10.3141/2375-06.
117. Zhao E., Walker P. D., Surawski N. C. Emissions life cycle assessment of diesel, hybrid and electric buses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2022. DOI: 10.1177/09544070211034318.
118. Lajunen A. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy*. 2016. Vol. 106. P. 329–342. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.075.
119. Nordelof A., Messagie M., Tillman A.-M., Ljunggren Soderman M., Van Mierlo J. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2014. DOI: 10.1007/s11367-014-0788-0.
120. Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Stromman A. H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*. 2013. Vol. 17(1). P. 53–64. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.
121. Chester M., Horvath A. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*. 2009. Vol. 4(2). DOI: 10.1088/1748-9326/4/2/024008.
122. Nordelof A., Grunditz E., Tillman A.-M., Thiringer T., Alatalo M. A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2018. DOI: 10.1007/s11367-018-1508-4.
123. Yan M., He H., Li M., Li G., Zhang X., Chen Z. A comprehensive life cycle assessment on dual-source pure electric bus. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 276. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122702.
124. Nordelof A., Poulikidou S., Chordia M., Bitencourt de Oliveira F., Tivander J., Arvidsson R. Methodological approaches to end-of-life modelling in life cycle assessments of lithium-ion batteries. *Batteries*. 2019. DOI: 10.3390/batteries5030051.
125. Liu Q., Hallquist A. M., Fallgren H., Jerksjo M. et al. Roadside assessment of a modern citybus fleet: gaseous and particle emissions. *Atmospheric Environment: X*. 2019. Vol. 3. DOI: 10.1016/j.aeaoa.2019.100044.
126. Osorio C., Nanduri K. Urban transportation emissions mitigation: coupling high-resolution vehicular emissions and traffic models for traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015. Vol. 81. P. 520–538. DOI: 10.1016/j.trb.2014.12.007.
127. Colak S., Lima A., Gonzalez M. C. Understanding congested travel in urban areas. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. DOI: 10.1038/ncomms10793.

128. Philips I., Anable J., Chatterton T. The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. DOI: 10.1038/s41467-023-37728-x.
129. Asensio O. I., Alvarez K., Dror A., Wenzel E., Hollauer C., Ha S.-H. Real-time data from mobile platforms to evaluate sustainable transportation infrastructure. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. P. 836–844. DOI: 10.1038/s41893-020-0553-9.
130. Zheng Y., Capra L., Wolfson O., Yang H. Urban computing: concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2014. Vol. 5(3). DOI: 10.1145/2629592.
131. Yao Z., Zhong Y., Qiang L., Wu J., Liu H., Yang F. Understanding human activity and urban mobility patterns from massive cellphone data: platform design and applications. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2020. Vol. 12(2). P. 150–163. DOI: 10.1109/MITS.2019.2962146.
132. Dembski F., Wossner U., Letzgus M., Ruddat M., Yamu C. Urban digital twins for smart cities and citizens: the case study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(6). DOI: 10.3390/su12062307.
133. Mugion R. G., Toni M., Raharjo H., Di Pietro L., Sebathu S. P. Does the service quality of urban public transport enhance sustainable mobility? *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 1566–1587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.052.
134. Awasthi A., Omrani H., Gerber P. Investigating ideal-solution based multicriteria decision making techniques for sustainability evaluation of urban mobility projects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. Vol. 116. P. 247–259. DOI: 10.1016/j.tra.2018.06.010.
135. Lopez-Carreiro I., Monzon A. Evaluating sustainability and innovation of mobility patterns in Spanish cities. Analysis by size and urban typology. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 38. P. 684–696. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.029.
136. Curiel-Esparza J., Mazario-Diez J. L., Canto-Perello J., Martin-Utrillas M. Prioritization by consensus of enhancements for sustainable mobility in urban areas. *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 55. P. 248–257. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.10.015.
137. Zope R., Vasudevan N., Arkatkar S. S., Joshi G. Benchmarking: a tool for evaluation and monitoring sustainability of urban transport system in metropolitan cities of India. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 45. P. 48–58. DOI: 10.1016/j.scs.2018.11.011.
138. Okraszewska R., Romanowska A., Wolek M., Oskarbski J., Birr K., Jamroz K. Integration of a multilevel transport system model into sustainable urban mobility planning. *Sustainability*. 2018. Vol. 10(2). DOI: 10.3390/su10020479.

139. Louro A., da Costa N. M., da Costa E. M. Sustainable urban mobility policies as a path to healthy cities—the case study of LMA, Portugal. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(10). DOI: 10.3390/su11102929.
140. Senne C. M., Lima J. P., Favaretto F. An index for the sustainability of integrated urban transport and logistics: the case study of Sao Paulo. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(21). DOI: 10.3390/su132112116.
141. Mozos-Blanco M. A., Pozo-Menendez E., Arce-Ruiz R., Baucells-Aleta` N. The way to sustainable mobility. A comparative analysis of sustainable mobility plans in Spain. *Transport Policy*. 2018. Vol. 72. P. 45–54. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.07.001.
142. Glazener A., Khreis H. Transforming our cities: best practices towards clean air and active transportation. *Current Environmental Health Reports*. 2019. Vol. 6. P. 22–37. DOI: 10.1007/s40572-019-0228-1.
143. Kiba-Janiak M., Witkowski J. Sustainable urban mobility plans: how do they work? *Sustainability*. 2019. Vol. 11(17). DOI: 10.3390/su11174605.
144. Hamurcu M., Eren T. Selection of electric buses for sustainable urban transportation by using a multicriteria decision making method. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(7). DOI: 10.3390/su12072727.
145. Esztergar-Kiss D., Kerényi T. Creation of mobility packages based on the MaaS concept. *Travel Behaviour and Society*. 2020. Vol. 21. P. 307–317. DOI: 10.1016/j.tbs.2019.05.007.
146. Lyons G., Hammond P., Mackay K. The importance of user perspective in the evolution of MaaS. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2019. Vol. 121. P. 22–36. DOI: 10.1016/j.tra.2018.12.010.
147. Jittrapirom P., Caiati V., Feneri A.-M., Ebrahimigharehbaghi S., Alonso-Gonzalez M. J., Narayan J. Mobility as a Service: a critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. *Urban Planning*. 2017. Vol. 2(2). P. 13–25. DOI: 10.17645/up.v2i2.931.
148. Durand A., Harms L., Hoogendoorn-Lanser S., Zijlstra T. Mobility-as-a-Service and changes in travel preferences and travel behaviour: a literature review. *Transport Reviews*. 2018. DOI: 10.1080/01441647.2018.1464116.
149. Wimbadi R. W., Djalante R., Mori A. Urban experiments with public transport for low carbon mobility transitions in cities: a systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 72. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103023.
150. Руткевич В. С. Кушнір В. П., Остапчук О. О. Інноваційні засоби для вивантаження стеблових кормів з траншейних сховищ DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-260-268. URL: <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2022/04/vknu-ts-2022-n1-305-260-268.pdf>

151. О. М., Виговська І. О., Гончар Л. О., Сироватко К. М. Ефективність застосування біологічних препаратів при силосуванні сумішки конюшини та нажитпці багатоквіткової/ Корми і кормовиробництво Міжвідомчий тематичний науковий збірник. № 84. Вінниця, 2017, С. 194-202 URL: <https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/19124.pdf> (дата звернення: 1.02.2026)
152. Теоретичні та практичні основи технологій виробництва продукції тваринництва/ Навчальний посібник //В.С., Ліннік ,А.Ю. Медведєв, В.Г. Прудников, Є.З. Петруша та ін.; За ред. д. с.-г. н, професора В.С. Лінніка – Луганськ: «Ельтон – 2», 2013.-239 с.
153. Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: Навчальний посібник/ [Ібатулін І.І., Чигрин А.І., Отченашко В.В. та ін.]; під ред. Академіка НААН України І.І. Ібатуліна.-Житомир: «Полісся»
154. Ration Formulation using the «Pearson Squar». Manading Livestock in Dry Times. URL: <https://salo.li/62E5f18> (дата звернення: 11.12.2025).
155. Wagner J., Stanton T. L. Rations calculation using Pearson's square – 1.618. Colorado State Universiti, URL: <https://salo.li/A1A7EB2> (дата звернення: 11.01.2026)
156. Mavromichalis I. Formulating feed using the Pearson Square method. FeedStrategy. 2020. 17 November. URL: <https://salo.li/CFdB12d> (дата звернення: 11.01.2026)
157. Нагорний С., Чалий О., Криворучко Ю., Косенко С. Методика розрахунку раціонів з використанням квадрату Пірсона для багатокомпонентних кормових сумішей. Аграрний вісник Причорномор'я / Одес. держ. аграр. ун-т. Одеса, 2024. Вип. 113. С. 75–87. DOI: 10.37000/abbsl.2024.113.13
158. Ковбасюк П. Технологія заготівлі якісного високопоживного силосу. Пропозиція Технологія заготівлі якісного високопоживного силосу. Пропозиція. 2009. URL: <https://salo.li/F15Fd3c> (дата звернення: 10.04.2025).
159. Pearson's Square & Mass Balancing Methods of Stndardization. Dairy Pulse. 2024. URL: <https://salo.li/583e161> (дата звернення: 08.04.2025).
160. Mathews. M Using Pearson's Square. URL: <https://salo.li/1D90525> (дата звернення: 08.011.2025).
161. Нагорний С. А., Чалий О. І., Криворучко Ю. І., Скляренко О. В., Косенко С. Ю., Слинько В.Г. Удосконалення розрахунків суміші молока і закваски у виробництві кумису за рахунок виведених формул на основі методу «квадрат Пірсона»/ Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва: зб. наук. праць. № 2 (198) 2025. Біла Церква: БНАУ, 2025. С. 101-110. DOI 10.33245

162. Нагорний С.А., Нагорна Т.А., Криворучко Ю.І., Чалий О.І. Удосконалення розрахунків нормалізації суміші молока різної жирності за рахунок виведених формул на основі методу «квадрат Пірсона»/The 5th International scientific and practical conference “Innovations of modern science and education” (January 29-31, 2026) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2026. P. 16-25. <https://surl.li/bmkaoy>

163. Нагорний Сергій, Косенко Світлана, Кісь Віктор. Теоретичне обґрунтування використання молока корів для виробництва кумису/ Title of the monograph - Agriculture, forestry, fisheries, veterinary medicine and natural sciences: latest ideas, problems and current status, USA – Primedia eLaunch LLC. С. 121-139. DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.AGRO.1.6.1, <https://surl.li/gukdmx>