

Дмитриченко М.Ф., Славінська О.С.,  
Усиченко О.Ю., Бубела А.В.,  
Рутковська І.А., Бондаренко Л.П.,  
Козарчук І.А., Куцман О.М.

Dmytrychenko M., Slavinska O.,  
Usychenko O., Bubela A.,  
Rutkovska I., Bondarenko L.,  
Kozarchuk I., Kutsman O.

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ В  
ТРАНСПОРТНОМУ  
БУДІВНИЦТВІ**

Навчальний посібник

**ENERGY EFFICIENT  
TECHNOLOGIES IN  
TRANSPORT  
CONSTRUCTION**

Study guide



Co-funded by  
the European Union

**Програма ЄС ERASMUS+ KA2**

Project ID number: 101082898  
ERASMUS-EDU-2022-CBHE



**ПРОЄКТ UKRENERGY**

«Innovative Master Courses Supporting the Improvement of the Energy  
and Carbon Footprint of the Ukrainian Building Stock»

Міністерство освіти і науки України  
Національний транспортний університет  
National Erasmus+ Office in Ukraine

**Дмитриченко М.Ф., Славінська О.С.,  
Усиченко О.Ю., Бубела А.В.,  
Рутковська І.А., Бондаренко Л.П.,  
Козарчук І.А., Куцман О.М.**

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
В ТРАНСПОРТНОМУ  
БУДІВНИЦТВІ**

Навчальний посібник  
для студентів закладів вищої освіти  
магістерського рівня спеціальності 192  
«Будівництво та цивільна інженерія»

Київ  
2025

Ministry of Education and Science of Ukraine  
National Transport University  
National Erasmus+ Office in Ukraine

**Dmytrychenko M., Slavinska O.,  
Usychenko O., Bubela A.,  
Rutkovska I., Bondarenko L.,  
Kozarchuk I., Kutsman O.**

**ENERGY EFFICIENT  
TECHNOLOGIES  
IN TRANSPORT  
CONSTRUCTION**

Study guide  
for students of higher education institutions of  
the master's level of speciality 192 "Civil and  
Civil Engineering"

Kyiv  
2025

*Рекомендовано до друку  
Вченою радою Національного  
транспортного університету  
(протокол № 3 від 27.03.2025)*

**Рецензенти:**

**Батракова А.Г.** – д-р техн. наук, проф., перший проректор ХНАДУ.

**Кузло М.Т.** – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри автомобільних доріг, основ та фундаментів НУВГП.

**Дмитриченко М.Ф., Славінська О.С.,  
Усиченко О.Ю., Бубела А.В.,  
Рутковська І.А., Бондаренко Л.П.,  
Козарчук І.А., Куцман О.М.**

Енергоефективні технології в транспортному будівництві: навчальний посібник для студентів закладів вищої освіти магістерського рівня спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Київ: НТУ, 2025. – 91 с.

ISBN 978-966-632-339-5

Посібник реалізується в рамках проекту UKRENERGY – 101082898, що співфінансується Європейським Союзом: «Інноваційні магістерські курси для підтримки покращення енергетичного та вуглецевого сліду будівельного фонду України».

У посібнику розглядаються результати досліджень та практичний досвід у сфері енергоефективності в автодорожньому будівництві.

Для енергоаудиторів, представників бізнесу та влади, науковців, аспірантів, викладачів, магістрів, бакалаврів, студентів технічних факультетів, а також для широкого кола читачів.

© 2025 М. Дмитриченко, О. Славінська,  
О. Усиченко, А. Бубела,  
І. Рутковська, Л. Бондаренко,  
І. Козарчук, О. Куцман

*Recommended for publication  
by the Academic Council of the National  
Transport University  
(minutes № 3 of 27 March 2025)*

**Reviewers:**

**Batrakova A.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of KhNADU.

**Kuzlo M.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Roads and Foundations of NUWEE.

**Dmytrychenko M., Slavinska O.,  
Usychenko O., Bubela A.,  
Rutkovska I., Bondarenko L.,  
Kozarchuk I., Kutsman O.**

Energy Efficient Technologies in Transport Construction: a study guide for students of higher education institutions of the master's level of speciality 192 “Civil and Civil Engineering”. – Kyiv: NTU, 2025. – 91 p.

ISBN 978-966-632-339-5

The guide is implemented within the framework of the UKRENERGY project – 101082898, co-funded by the European Union: “Innovative master’s courses to support the improvement of the energy and carbon footprint of the Ukrainian building stock”.

The guide reviews the results of research and practical experience in the field of energy efficiency in road construction.

For energy auditors, of business and government representatives, researchers, postgraduates, teachers, masters, bachelors, students of technical faculties, as well as for a wide range of readers.

© 2025 M. Dmytrychenko, O. Slavinska,  
O. Usychenko, A. Bubela,  
I. Rutkovska, L. Bondarenko,  
I. Kozarchuk, O. Kutsman

## ПЕРЕДМОВА

Посібник розроблено в рамках виконання проекту «UKRENERGY» програми Erasmus+ KA2 (Розбудова потенціалу у сфері вищої освіти: Напрямок 2 – Партнерство для трансформації вищої освіти ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2). Проект спрямований на запровадження передових практик Європейського Союзу, пов'язаних із енергоефективністю та енергетичним плануванням, під час підготовки студентів-магістрів в українських університетах з метою покращення енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду у будівельному фонді України.

Автори посібника висловлюють подяку професорсько-викладацькому складу Університету Генуї, Словацького технічного університету в Братиславі, Університету Кампанії імені Луїджі Ванвітеллі та Гірничо-металургійної академії імені Станіслава Сташиця.

## PREFACE

The study guide was developed within the framework of the UKRENERGY project of the Erasmus+ KA2 programme (Capacity Building in Higher Education: Strand 2 – Partnership for the Transformation of Higher Education ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2). The project aims to introduce EU best practices related to energy efficiency and energy planning in the training of Master's students at Ukrainian universities in order to improve energy efficiency and reduce the carbon footprint of the Ukrainian building stock.

The authors of the guide would like to express their gratitude to the faculties of the University of Genoa, the Slovak University of Technology in Bratislava, the University of Campania Luigi Vanvitelli, and the AGH University of Krakow.

**ЗМІСТ**

	Стор.
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.....	8
1.1 Експериментальний (інструментальний) метод (енергетичний аудит) .....	8
1.2 Метод енергетичного балансу.....	11
1.3 Метод статистичного аналізу.....	12
1.4 Метод моделювання.....	13
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЄМНОСТІ БУДІВНИЦТВА ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ.....	16
2.1 Основи передачі теплової енергії... ..	16
2.2 Енергоспоживання на різних етапах виробництва асфальтобетонної суміші.....	16
2.3 Енергоспоживання на різних етапах будівництва дорожнього одягу.....	21
2.4 Розрахунок викидів CO <sub>2</sub> .....	25
РОЗДІЛ 3. АГРЕГАТИ АСФАЛЬТОЗМІШУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ТА ЕНЕРГІЯ, ЩО СПОЖИВАЄТЬСЯ ЗАВОДОМ.....	27
3.1 Складування та зберігання матеріалів.....	27
3.2 Агрегати живлення.....	28
3.3 Бітумосховища та бітумонагрівачі.....	29
3.4 Сушильні барабани установок.....	31
3.5 Гарячі елеватори та сортувальні агрегати.....	37
3.6 Дозувальні агрегати.....	38
3.7 Змішувачі для приготування асфальтобетонних сумішей.....	38
3.8 Агрегати для боротьби з пилом.....	41
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ.....	46
4.1 Зберігання, обробка, сушіння та нагрівання заповнювачів.....	46
4.2 Бітумне господарство.....	49
4.3 Оптимізація виробництва.....	51
4.4 Нові види матеріалів.....	52
РОЗДІЛ 5. ІНВЕСТИЦІЙНА ОЦІНКА ПРОЄКТІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	59
5.1 Основи управління проектами.....	59
5.2 Поточна вартість.....	60

**CONTENTS**

	Page
INTRODUCTION.....	6
CHAPTER 1. METHODS FOR DETERMINING ENERGY CONSUMPTION.....	8
1.1 Experimental (instrumental) method (energy audit) .....	8
1.2 Energy balance method.....	11
1.3 Statistical analysis method.....	12
1.4 Modeling method.....	13
CHAPTER 2. CALCULATION OF ENERGY INTENSITY OF ROAD PAVEMENT CONSTRUCTION.....	16
2.1 Fundamentals of heat transfer.....	16
2.2 Energy consumption at different stages of asphalt mix production.....	16
2.3 Energy consumption at different stages of pavement construction.....	21
2.4 Calculating CO <sub>2</sub> emissions.....	25
CHAPTER 3. ASPHALT MIXING PLANT UNITS AND ENERGY CONSUMPTION BY THE PLANT.....	27
3.1 Warehousing and storage of materials	27
3.2 Feeding units.....	28
3.3 Bitumen storage facilities and bitumen heaters.....	29
3.4 Drying drums of installations.....	31
3.5 Hot elevators and sorting units.....	37
3.6 Dosing units.....	38
3.7 Mixers for the preparation of asphalt mixtures.....	38
3.8 Dust control units.....	41
CHAPTER 4. METHODS OF REDUCING ENERGY CONSUMPTION IN THE MANUFACTURE OF ASPHALT MIXTURES.....	46
4.1 Storage, processing, drying and heating of aggregates.....	46
4.2 Bitumen infrastructure.....	49
4.3 Production optimization.....	51
4.4 New types of materials.....	52
CHAPTER 5. INVESTMENT ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECTS.....	59
5.1 Basics of project management.....	59
5.2 Present value.....	60

5.3 Інвестиційна оцінка проекту.....	64	5.3 Investment valuation of a project.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ		REFERENCES.....	75
ЛІТЕРАТУРИ.....	75		
ДОДАТОК 1. ПРИКЛАД		APPENDIX 1. EXAMPLE	
РОЗРАХУНКУ.....	78	CALCULATION.....	78
ДОДАТОК 2. КОМПОНЕНТИ		APPENDIX 2. COMPONENTS OF THE	
АСФАЛЬТОЗМІШУВАЛЬНОЇ		ASPHALT MIXING PLANT	
УСТАНОВКИ КДМ209.....	86	KDM209.....	86
ДОДАТОК 3. ТЕХНІЧНІ		APPENDIX 3. TECHNICAL	
ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТО-		SPECIFICATIONS OF THE ASPHALT	
ЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ		MIXING PLANT KDM209.....	86
КДМ209.....	86		
ДОДАТОК 4. ВИТРАТИ		APPENDIX 4. MATERIAL	
МАТЕРІАЛІВ НА ПРИГОТУВАННЯ		CONSUMPTION FOR PREPARING	
ОДНІЄЇ ТОННИ АСФАЛЬТО-		ONE TONNE OF ASPHALT	
БЕТОНУ.....	87	CONCRETE.....	87
ДОДАТОК 5. ВЕЛИЧИНИ, ЩО		APPENDIX 5. VALUES USED FOR	
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ РОЗ-		CALCULATING THE ENERGY	
РАХУНКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ		CONSUMPTION OF ASPHALT	
ПРИ ПРИГОТУВАННІ АСФАЛЬТО-		CONCRETE MIX PREPARING.....	88
БЕТОННОЇ СУМІШІ.....	88		
ДОДАТОК 6. ПАЛИВО, НЕОБХІДНЕ		APPENDIX 6. FUEL REQUIRED TO	
ДЛЯ ВИСУШУВАННЯ		DRY AGGREGATE (ASPHALT	
ЗАПОВНЮВАЧА (НА АСФАЛЬТО-		PLANTS) (WOODROW J.H., TABLE	
БЕТОННИХ ЗАВОДАХ) (WOODROW		16 [5]).....	89
J.H., ТАБЛ. 16 [5]).....	89		
ДОДАТОК 7. ОРІЄНТОВНЕ		APPENDIX 7. ESTIMATED ENERGY	
ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ НА		USE IN CONVENTIONAL ASPHALT	
ЗВИЧАЙНИХ АСФАЛЬТО-		PLANT OPERATIONS A)	
БЕТОННИХ ЗАВОДАХ А)		(WOODROW J.H., TABLE 17 [5]).....	89
(WOODROW J.H., ТАБЛ. 17 [5]).....	89		
ДОДАТОК 8. ВИТРАТА ПАЛЬНОГО		APPENDIX 8. ESTIMATES OF FUEL	
ВАНТАЖІВКАМИ, ЯКІ ПЕРЕ-		USE BY TRUCKS HAULING	
ВОЗЯТЬ ДОРОЖНІ БУДІВЕЛЬНІ		HIGHWAY CONSTRUCTION	
МАТЕРІАЛИ (WOODROW J.H.,		MATERIALS (WOODROW J.H.,	
ТАБЛ. 14 [5]).....	90	TABLE 14 [5]).....	90
ДОДАТОК 9. ПЕРЕРАХУНОК		APPENDIX 9. PROCESSING AND	
ЕНЕРГІЇ ПЕРЕРОБКИ ТА		CALORIFIC ENERGY FACTORS IN	
ТЕПЛОТВОРНОЇ ЕНЕРГІЇ В		TERMS OF EQUIVALENT GALLONS	
ЕКВІВАЛЕНТ ДИЗЕЛЬНОГО		OF DIESEL FUEL A) (WOODROW	
ПАЛИВА ТА ОДИНИЦІ СІ А)		J.H., TABLE B-1 [5]).....	90
(WOODROW J.H., ТАБЛ. B-1 [5]).....	90		

## ВСТУП

У сучасному світі, де екологічні та економічні виклики стають дедалі гострішими, питання енергозбереження набуває особливої актуальності. Однією із ключових галузей інфраструктури, що має значний вплив на навколишнє середовище та споживання енергоресурсів є будівництво автомобільних доріг. Тому пошук та впровадження енергозберігаючих технологій у цій сфері є не лише необхідністю, але й стратегічним пріоритетом.

Мережа автомобільних доріг загального користування України має довжину близько 169,6 тис. км. Із загальної протяжності доріг з твердим покриттям, дороги з удосконаленими типами (цементобетон, асфальтобетон, чорні шосе) становлять близько 130,0 тис. км (при цьому, частка доріг із асфальтобетоном складає понад 40 %), решта – з перехідними типами (білі щебеневі і гравійні, бруківки). Крім того, до вулично-дорожньої мережі можна віднести близько 250 тис. км міських вулиць і доріг, а також відомчі і внутрішньогосподарські дороги, де також переважають тверді покриття із асфальтобетону.

Асфальтобетон, хоча й має численні переваги перед іншими матеріалами, є надзвичайно енергоємним. Виробництво та укладання асфальтобетонних сумішей вимагає значних витрат енергії, особливо на етапі приготування. Тому, в умовах зростання цін на енергоносії та посилення екологічних вимог, пошук та впровадження енергозберігаючих технологій у будівництві автомобільних доріг з асфальтобетонним покриттям є критично важливим.

Цей навчальний посібник присвячений вивченню та застосуванню енергозберігаючих технологій у будівництві автомобільних доріг, з акцентом на асфальтобетонних покриттях, які є найбільш поширеними в Україні.

Метою посібника є надання здобувачам вищої освіти, інженерам та іншим фахівцям дорожньої галузі знань і навичок, необхідних для ефективного застосування енергозберігаючих технологій у будівництві автомобільних доріг.

## INTRODUCTION

In today's world, where environmental and economic challenges are becoming increasingly acute, the issue of energy saving is becoming particularly relevant. One of the key infrastructure sectors that has a significant impact on the environment and energy consumption is road construction. Therefore, the search for and implementation of energy-saving technologies in this area is not only a necessity but also a strategic priority.

The network of public roads in Ukraine is about 169,6 thousand kilometers long. Out of the total length of paved roads, roads with improved types (cement concrete, asphalt concrete, black highways) account for about 130,0 thousand km (with the share of asphalt concrete roads being over 40%), while the rest are of transitional types (white gravel and gravel roads, paving stones). In addition, the street and road network includes about 250 thousand km of city streets and roads, as well as departmental and intra-economic roads, which are also dominated by hard asphalt concrete pavements.

Even though asphalt concrete has numerous advantages over other materials, it is extremely energy-intensive. The production and placement of asphalt mixtures requires significant energy consumption, especially during the preparation phase. Therefore, in the context of rising energy prices and tightening environmental requirements, the search for and implementation of energy-saving technologies in the construction of asphalt concrete roads is critically important.

This study guide is dedicated to the study and application of energy-saving technologies in road construction, with an emphasis on asphalt pavements, which are the most common in Ukraine.

The purpose of the guide is to provide higher education students, engineers and other road industry professionals with the knowledge and skills necessary for the effective application of energy-saving technologies in road construction.

Структура посібника охоплює низку тем, починаючи від аналізу енергоефективності традиційних методів будівництва до розгляду різних способів заощадження енергії (технологій, матеріалів тощо).

Наведені в цьому підручнику методи та заходи забезпечення енергоефективності не є вичерпними і всеосяжними, однак, на думку авторів, вони є найбільш дієвими. Ми сподіваємося, що цей матеріал стане цінним ресурсом для тих, хто прагне зробити свій внесок у створення більш екологічно чистої та економічно ефективної транспортної інфраструктури.

The structure of the guide covers a number of topics, ranging from the analysis of energy efficiency of traditional construction methods to the consideration of various ways to save energy (technologies, materials, etc.).

The energy efficiency methods and measures presented in this handbook are not exhaustive and comprehensive, but the authors believe they are the most effective. We hope that this material will be a valuable resource for those seeking to contribute to a more environmentally friendly and cost-effective transport infrastructure.

## РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Визначення енергоспоживання промислових підприємств є важливим етапом для оптимізації витрат, підвищення енергоефективності та зменшення впливу на довкілля. За способом отримання даних, методи визначення енергоспоживання умовно можна поділити на дві групи: розрахункові методи та експериментальні методи.

**Розрахункові методи** базуються на математичних моделях та фізичних законах для оцінки енергоспоживання. Вони використовуються на етапах проектування та планування, а також для оцінки енергоефективності існуючих об'єктів. До цієї групи відносяться методи: енергетичного балансу, статистичного аналізу, моделювання.

**Експериментальні методи** передбачають безпосереднє вимірювання енергоспоживання за допомогою спеціальних приладів. Вони забезпечують більш точні дані, але вимагають додаткових витрат на обладнання та проведення вимірювань. До них відносять: вимірювання за допомогою лічильників, тепловізійне обстеження, вимірювання потужності.

Різні методи визначення енергоспоживання можна застосовувати як окремо, так і в комбінації. При виборі методу для оцінювання витрат енергії на виробництво, слід урахувати такі фактори:

- розмір та складність підприємства;
- наявність необхідного обладнання та фахівців;
- бюджет, виділений на проведення аналізу;
- необхідна точність результатів.

Використання комбінації методів дозволяє отримати найбільш повну та достовірну інформацію про споживання енергії підприємством.

## CHAPTER 1. METHODS FOR DETERMINING ENERGY CONSUMPTION

Determining the energy consumption of industrial enterprises is an important step in optimizing costs, improving energy efficiency and reducing environmental impact. Based on the method of data acquisition, energy consumption methods can be divided into two groups: calculation methods and experimental methods.

**Calculation methods** are based on mathematical models and physical laws to estimate energy consumption. They are used at the design and planning stages, as well as to assess the energy efficiency of existing facilities. This group includes methods of energy balance, statistical analysis, and modeling.

**Experimental methods** involve the direct measurement of energy consumption using special devices. They provide more accurate data, but require additional costs for equipment and measurements. These include: measuring with meters, thermal imaging, power measurement.

Different methods of determining energy consumption can be used individually or in combination. The following factors should be taken into account when choosing a method for estimating energy consumption for production:

- size and complexity of the enterprise;
- availability of necessary equipment and specialists;
- budget allocated for the analysis;
- the required accuracy of the results.

The use of a combination of methods allows you to obtain the most complete and reliable information on energy consumption by an enterprise.

## 1.1 Експериментальний (інструментальний) метод (енергетичний аудит)

Інструментальний метод, або енергетичний аудит, є найдетальнішим та найточнішим способом визначення енергоспоживання промислового підприємства. Він передбачає комплексне обстеження підприємства з використанням спеціальних приладів для вимірювання споживання енергії різними видами обладнання. Цей метод дозволяє отримати точні та детальні дані про споживання енергії в різних точках підприємства.

Застосування інструментального методу [1] дає можливість: визначення фактичного рівня енергоспоживання підприємства, виявлення неефективних ділянок та втрат енергії, оцінки потенціалу енергозбереження, розробки рекомендацій щодо підвищення енергетичної ефективності.

Роботи з проведення енергетичного аудиту складаються з чотирьох етапів:

**1. Підготовка.** На цьому етапі виконують збір інформації про підприємство (технологічні процеси, обладнання, графіки роботи), визначають мету та завдання аудиту, а також складають складання плану проведення аудиту.

**2. Інструментальне обстеження.** На етапі обстеження виконують вимірювання відповідних показників: споживання електроенергії; витрат палива; теплової енергії; параметрів систем освітлення, вентиляції, кондиціонування. За потреби, виконують тепловізійне обстеження будівель та обладнання.

**3. Аналіз даних.** На цьому етапі виконується обробка та аналіз результатів вимірювань, розрахунок питомих показників енергоспоживання. На основі отриманої інформації про рівень енергоспоживання підприємства виконують виявлення причин неефективного використання енергії та оцінювання потенціалу енергозбереження.

**4. Розробка звіту.** За результатами попередніх етапів виконується складання звіту про результати аудиту, а також, за необхідності, розроблення рекомендацій щодо впровадження енергозберігаючих заходів і оцінювання економічної ефективності цих заходів.

## 1.1 Experimental (instrumental) method (energy audit)

The instrumental method, or energy audit, is the most detailed and accurate way to determine the energy consumption of an industrial enterprise. It involves a comprehensive examination of the enterprise using special devices for measuring energy consumption by various types of equipment. This method allows you to obtain accurate and detailed data on energy consumption at different points of the enterprise.

The use of the instrumental method [1] makes it possible to: determine the actual level of energy consumption of the enterprise, identify inefficient areas and energy losses, assess the potential for energy savings, and develop recommendations for improving energy efficiency.

The work on conducting an energy audit consists of four stages:

**1. Preparation.** At this stage, information about the enterprise (technological processes, equipment, work schedules) is collected, the goal and objectives of the audit are determined, and an audit plan is drawn up.

**2. Instrumental survey.** At the survey stage, measurements of the following indicators are performed: electricity consumption; fuel consumption; thermal energy; parameters of lighting, ventilation, air conditioning systems. If necessary, thermal imaging surveys of buildings and equipment are performed.

**3. Data analysis.** At this stage, processing and analysis of measurement results are performed, and specific energy consumption indicators are calculated. Based on the information received on the level of energy consumption of the enterprise, the causes of inefficient energy use are identified and the energy saving potential is assessed.

**4. Report development.** Based on the results of the previous stages, a report on the audit results is drawn up, as well as, if necessary, recommendations for the implementation of energy-saving measures and assessment of the economic efficiency of these measures are developed.

На етапі інструментального обстеження для вимірювання відповідних показників можуть застосовуватись різноманітні прилади та обладнання.

Для вимірювання споживання електроенергії (потужність, струм, напруга) – електролічильники (для обліку загального споживання електроенергії); аналізатори якості електроенергії або мультиметри (для вимірювання напруги, струму, потужності, коефіцієнта потужності та інших параметрів); кліщі струмовимірювальні (для вимірювання струму в електричних колах без розриву ланцюга).

Для вимірювання теплової енергії (пара, гаряча вода) – теплолічильники (для обліку споживання теплової енергії в системах опалення та гарячого водопостачання); тепловізори (для виявлення втрат тепла); термометри та термографи (для вимірювання температури поверхонь та повітря) водолічильники (для обліку споживання холодної та гарячої води).

Для вимірювання витрат палива (дизельне паливо, газ, мазут, вугілля тощо) – лічильники та витратоміри, анемометри (для обліку витрати газу, рідкого палива та інших енергоносіїв); газоаналізатори (для визначення складу димових газів та оцінки ефективності згоряння палива).

Для вимірювання параметрів систем освітлення, вентиляції, кондиціонування – люксметри (прилад для вимірювання освітленості); анемометри (для вимірювання швидкості і напрямку руху повітря); пірометри та гігрометри (для вимірювання параметрів мікроклімату).

Інструментальний метод має ряд недоліків і переваг.

До недоліків можна віднести наступне: висока вартість (придбання та встановлення вимірювальних приладів може бути досить дорогим); необхідність залучення кваліфікованого персоналу (для проведення вимірювань та аналізу даних потрібні фахівці з відповідними знаннями та навичками; трудомісткість (встановлення вимірювальних пристроїв та збір даних може займати багато часу). Серед переваг цього методу є: висока точність (дозволяє отримати достовірні дані про споживання енергії); деталізація (дає можливість виміряти споживання енергії в окремих точках підприємства та на окремому обладнанні); можливість моніторингу

At the stage of instrumental survey, various devices and equipment can be used to measure the relevant indicators.

To measure electricity consumption (power, current, voltage) – electricity meters (for accounting for total electricity consumption); electricity quality analyzers or multimeters (for measuring voltage, current, power, power factor and other parameters); current clamps (for measuring current in electrical circuits without breaking the circuit).

For measuring thermal energy (steam, hot water) – heat meters (for recording thermal energy consumption in heating and hot water supply systems); thermal imagers (for detecting heat losses); thermometers and thermographs (for measuring surface and air temperature); water meters (for recording cold and hot water consumption).

For measuring fuel consumption (diesel fuel, gas, fuel oil, coal, etc.) – meters and flow meters, anemometers (for recording gas, liquid fuel and other energy sources); gas analyzers (for determining the composition of flue gases and assessing the efficiency of fuel combustion).

For measuring the parameters of lighting, ventilation and air conditioning systems – luxmeters (a device for measuring illumination); anemometers (for measuring the speed and direction of air movement); pyrometers and hygrometers (for measuring microclimate parameters).

The instrumental method has a number of disadvantages and advantages.

The disadvantages include the following: high cost (purchase and installation of measuring devices can be quite expensive); the need to hire qualified personnel (for measurements and data analysis, specialists with appropriate knowledge and skills are required; laboriousness (installation of measuring devices and data collection can take a lot of time). The advantages of this method include: high accuracy (allows you to obtain reliable data on energy consumption); detailing (makes it possible to measure energy consumption at individual points of the enterprise and on individual equipment); the possibility of monitoring (allows you to track

(дозволяє відстежувати зміни в споживанні енергії в режимі реального часу); можливість виявлення проблем (за допомогою інструментальних вимірювань можливо виявити місця втрат енергії, нераціональне використання ресурсів та інші проблеми).

Однак, незважаючи на зазначені недоліки, переваги інструментального вимірювання дозволяють отримати точні та детальні дані, які необхідні для розробки та реалізації заходів з енергозбереження.

## 1.2 Метод енергетичного балансу

Метод енергетичного балансу – це інструмент, який дозволяє отримати повну картину надходження та використання енергії на підприємстві [2]. Він показує, куди надходить енергія, як вона перетворюється та де втрачається. Основні складові методу включають: прибуткову частину (яка включає всі джерела надходження енергії на підприємство), видаткову частину (яка показує, куди витрачається енергія), баланс (таблиця 1.1).

changes in energy consumption in real time); the possibility of identifying problems (using instrumental measurements, it is possible to identify places of energy loss, irrational use of resources and other problems).

However, despite the above disadvantages, the advantages of instrumental measurement allow you to obtain accurate and detailed data that are necessary for the development and implementation of energy saving measures.

## 1.2 Energy balance method

The energy balance method is a tool that allows you to get a complete picture of the receipt and use of energy at the enterprise [2]. It shows where energy comes from, how it is transformed and where it is lost. The main components of the method include: the income part (which includes all sources of energy receipt at the enterprise), the expenditure part (which shows where energy is spent), the balance (table 1.1).

Таблиця 1.1 – Основні складові методу енергетичного балансу  
Table 1.1 – The main components of the energy balance method

Прибуткова частина Income part		Видаткова частина Expenditure part		Баланс Balance
Електроенергія з мережі. Природний газ. Вугілля. Мазут. Теплова енергія (пара, гаряча вода). Відновлювані джерела енергії (сонячна, вітрова).	Electricity from the network. Natural gas. Coal. Fuel oil. Thermal energy (steam, hot water). Renewable energy sources (solar, wind).	Виробничі процеси. Освітлення. Опалення та вентильація. Робота обладнання. Втрати енергії (теплові втрати, втрати в мережах).	Production processes. Lighting. Heating and ventilation. Equipment operation. Energy losses (heat losses, losses in networks).	Порівняння прибуткової та видаткової частин  Comparison of the income and expenditure parts

Складання енергетичного балансу виконується у чотири етапи:

### 1. Збір даних:

- Збір інформації про всі джерела надходження та витрати енергії.
- Вимірювання споживання енергії різними видами обладнання.
- Аналіз рахунків за енергоносіями.

The energy balance is compiled in four stages:

### 1. Data collection:

- Collecting information on all sources of energy input and output.
- Measuring energy consumption by various types of equipment.
- Analysis of energy bills.

## 2. Розрахунок:

- a) Розрахунок кількості енергії, що надходить та витрачається.
- b) Переведення різних видів енергії в єдину одиницю виміру (наприклад, кВт·год).

**3. Складання балансу.** Складання таблиці, що відображає прибуткову та видаткову частини балансу.

**4. Аналіз.** Аналіз балансу для виявлення невідповідностей та втрат енергії.

Метод енергетичного балансу – це важливий інструмент для підвищення енергетичної ефективності промислових підприємств і серед його переваг можна відзначити, що він:

- дозволяє отримати повну картину енергоспоживання підприємства;
- допомагає виявити неефективні ділянки та втрати енергії;
- сприяє розробці заходів з енергозбереження;
- дає можливість оцінити ефективність використання енергії та розробити заходи з оптимізації енергетичних процесів на підприємстві.

### 1.3 Метод статистичного аналізу

Аналітичний метод визначення енергоспоживання промислових підприємств – це комплексний підхід, який базується на аналізі наявних даних та статистичної інформації. Він дозволяє оцінити ефективність використання енергії, виявити тенденції та закономірності, а також спрогнозувати майбутнє енергоспоживання [3].

Аналітичний метод складається із п'яти основних етапів: збір даних; обробка даних; аналіз даних; візуалізація даних; інтерпретація результатів.

**Етап збору даних** передбачає отримання інформації для аналізу енергоспоживання та виробництва (показників із лічильників електроенергії, тепла, газу, води та інших енергоносіїв), збір інформації про технологічні процеси та умови виробництва (технологічні карти, звіти про виробництво, метеорологічні дані, тощо), з метою формування бази даних для подальшого аналізу.

## 2. Calculation:

- a) Calculating the amount of energy input and output.
- b) Converting different types of energy into a single unit of measurement (for example, kW·h).

**3. Balance sheet compilation.** Compilation of a table reflecting the income and expenditure parts of the balance sheet.

**4. Analysis.** Analysis of the balance sheet to identify discrepancies and energy losses.

The energy balance method is an important tool for improving the energy efficiency of industrial enterprises and among its advantages it can be noted that it:

- allows you to get a complete picture of the enterprise's energy consumption;
- helps identify inefficient areas and energy losses;
- contributes to the development of energy saving measures;
- makes it possible to assess the efficiency of energy use and develop measures to optimize energy processes at the enterprise.

### 1.3 Statistical analysis method

The analytical method for determining the energy consumption of industrial enterprises is a comprehensive approach based on the analysis of available data and statistical information. It allows you to assess the efficiency of energy use, identify trends and patterns, and also predict future energy consumption [3].

The analytical method consists of five main stages: data collection; data processing; data analysis; data visualization; interpretation of results.

**The data collection stage** involves obtaining information for the analysis of energy consumption and production (indicators from electricity, heat, gas, water and other energy meters), collecting information about technological processes and production conditions (technological maps, production reports, meteorological data, etc.), in order to form a database for further analysis.

**Етап обробки даних** включає перевірку отриманої інформації на достовірність та повноту, видалення або коригування аномальних значень, а також перетворення даних у зручний для аналізу формат.

**На етапі аналізу даних** виявляють тенденції та закономірності у споживанні енергії, визначають питомі витрати енергії на одиницю продукції, порівнюють споживання енергії з нормативами та показниками інших підприємств галузі, а також виявляють причини відхилень від нормального споживання енергії. Для цього використовують статистичні методи аналізу. Інструментами для аналізу даних можуть бути: програмне забезпечення для обліку та аналізу енергоспоживання, статистичні пакети (Microsoft Excel, Google Sheets, R, Python та інші).

**Етап візуалізації даних** передбачає створення візуальних представлень результатів аналізу, що дозволяє краще зрозуміти закономірності та тенденції у споживанні енергії. Візуалізація даних виконується за допомогою графіків, діаграм.

**На етапі інтерпретації результатів** формулюються висновки на основі аналізу даних, розробляються рекомендації щодо заходів з енергозбереження та оцінюється економічна ефективність цих заходів.

Аналіз даних є досить зручним і потужним інструментом для оптимізації енергоспоживання промислових підприємств. Він дозволяє виявити резерви енергозбереження та підвищити енергетичну ефективність виробництва.

#### **1.4 Метод моделювання**

Моделювання енергоспоживання промислових підприємств – це створення математичних або комп'ютерних моделей для прогнозування та аналізу енерговитрат на виробництві. При прогнозуванні енергоспоживання методом моделювання оцінюється вплив на споживання енергії змін у режимах роботи обладнання, технологічних процесах або зовнішніх умовах (наприклад, температура). Моделювання дає можливість оптимізувати енергоспоживання шляхом виявлення режимів роботи обладнання та технологічних процесів, які забезпечують мінімальне споживання енергії при

**The data processing stage** includes checking the received information for accuracy and completeness, removing or correcting anomalous values, and converting data into a format convenient for analysis.

**At the data analysis stage**, trends and patterns in energy consumption are identified, specific energy consumption per unit of output is determined, energy consumption is compared with standards and indicators of other enterprises in the industry, and the causes of deviations from normal energy consumption are identified. Statistical analysis methods are used for this purpose. Data analysis tools can be: software for accounting and analysis of energy consumption, statistical packages (Microsoft Excel, Google Sheets, R, Python, and others).

**The data visualization stage** involves creating visual representations of the analysis results, which allows for a better understanding of patterns and trends in energy consumption. Data visualization is performed using graphs and charts.

**At the results interpretation stage**, conclusions are formulated based on data analysis, recommendations are developed for energy saving measures, and the cost-effectiveness of these measures is assessed.

Data analysis is a very convenient and powerful tool for optimizing energy consumption in industrial enterprises. It allows you to identify energy savings reserves and increase energy efficiency in production.

#### **1.4 Modeling method**

Modeling energy consumption of industrial enterprises is the creation of mathematical or computer models for forecasting and analyzing energy consumption in production. When forecasting energy consumption by modeling, the impact on energy consumption of changes in equipment operating modes, technological processes, or external conditions (for example, temperature) is assessed. Modeling makes it possible to optimize energy consumption by identifying equipment operating modes and technological processes that ensure minimal energy consumption while maintaining the required

збереженні необхідної продуктивності, а також прогнозувати, як впровадження тих чи інших енергозберігаючих заходів вплине на споживання енергії та економічні показники підприємства.

Для точної моделі збирають дані про тип виробництва, технології, виробничі процеси, обладнання, енергоспоживання, енергоефективність будівель, клімат та інші фактори, потім обирають модель – статистичну, фізичну або машинного навчання – та перевіряють її точність, порівнюючи прогнози з реальними даними. Модель дозволяє аналізувати вплив факторів на енергоспоживання, знаходити можливості оптимізації та прогнозувати майбутнє споживання, використовуючи різні програми. Можуть використовуватись різні методи моделювання, такі як:

- динамічне моделювання – відображає зміни параметрів системи в часі;
- статистичне моделювання – використовує статистичні методи для аналізу даних та прогнозування енергоспоживання;
- імітаційне моделювання – відтворює поведінку реальної системи шляхом імітації її окремих елементів;

В енергетичному моделюванні використовуються математичний та комп'ютерний типи моделей.

**Математичні моделі** описують технологічні процеси та енергоємні системи за допомогою математичних рівнянь. Такі моделі можуть бути аналітичними (що дозволяють отримати точні розв'язки) або числовими (що вимагають використання комп'ютерів для розв'язання).

**Комп'ютерні моделі** створюються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення і дозволяють моделювати складні технологічні процеси та енергоємні системи з високою точністю.

Для моделювання енергоспоживання промислових підприємств можуть застосовуватись різноманітні інструменти, зокрема:

- програми для статистичного аналізу: мови програмування R, Python;
- програми для моделювання фізичних процесів: MATLAB, Simulink.
- інструменти для машинного навчання: TensorFlow, Scikit-learn;
- програмне забезпечення для енергетичного менеджменту.

productivity, as well as predicting how the implementation of certain energy-saving measures will affect energy consumption and economic indicators of the enterprise.

For an accurate model, data is collected on the type of production, technology, production processes, equipment, energy consumption, energy efficiency of buildings, climate, and other factors, then a model is selected – statistical, physical, or machine learning – and its accuracy is checked by comparing forecasts with real data. The model allows you to analyze the impact of factors on energy consumption, find optimization opportunities, and predict future consumption using various programs. Various modeling methods can be used, such as:

- dynamic modeling – reflects changes in system parameters over time;
- statistical modeling – uses statistical methods to analyze data and predict energy consumption;
- simulation modeling – reproduces the behavior of a real system by simulating its individual elements;

Energy modeling uses mathematical and computer types of models.

**Mathematical models** describe technological processes and energy-intensive systems using mathematical equations. Such models can be analytical (allowing for obtaining accurate solutions) or numerical (requiring the use of computers for solution).

**Computer models** are created using specialized software and allow modeling complex technological processes and energy-intensive systems with high accuracy.

Various tools can be used to model the energy consumption of industrial enterprises, in particular:

- programs for statistical analysis: programming languages R, Python;
- programs for modeling physical processes: MATLAB, Simulink;
- machine learning tools: TensorFlow, Scikit-learn;
- energy management software.

Моделювання енергоспоживання складається з наступних етапів:

1) Збір даних (збір інформації про енергоспоживання, виробничі процеси, обладнання, кліматичні умови).

2) Вибір моделі (визначення найбільш підходящої моделі для конкретного підприємства).

3) Побудова моделі (розробка математичної або комп'ютерної моделі).

4) Валідація моделі (перевірка точності моделі шляхом порівняння прогнозів з реальними даними).

5) Аналіз результатів (аналіз впливу різних факторів на енергоспоживання, виявлення можливостей для оптимізації).

6) Впровадження рекомендацій (розробка та впровадження заходів з енергозбереження).

Застосування методу моделювання дозволяє підприємствам прийти до обгрунтованого прийняття рішень щодо: зниження витрат на енергію; зменшення впливу на довкілля; поліпшення управління енергетичними ресурсами та підвищення конкурентоспроможності.

Разом з тим, метод моделювання має деякі недоліки, серед яких: створення точних і надійних моделей вимагає значних знань і досвіду, а спеціалізоване програмне забезпечення та обладнання для моделювання можуть бути дорогими; розробка та аналіз складних моделей може займати багато часу; неправильні припущення можуть призвести до значних помилок у результатах моделювання. Відповідно, важливо враховувати ці недоліки при використанні моделювання й ретельно підходити до вибору типу моделі, збору даних і аналізу результатів.

Energy consumption modeling consists of the following stages:

1) Data collection (collection of information on energy consumption, production processes, equipment, climatic conditions).

2) Model selection (determination of the most suitable model for a particular enterprise).

3) Model construction (development of a mathematical or computer model).

4) Model validation (verification of the accuracy of the model by comparing forecasts with real data).

5) Analysis of results (analysis of the impact of various factors on energy consumption, identification of opportunities for optimization).

6) Implementation of recommendations (development and implementation of energy saving measures).

The use of the modeling method allows enterprises to make informed decisions regarding: reducing energy costs; reducing environmental impact; improving energy resource management and increasing competitiveness.

However, the modeling method has some disadvantages, including: creating accurate and reliable models requires significant knowledge and experience, and specialized modeling software and equipment can be expensive; developing and analyzing complex models can be time-consuming; and incorrect assumptions can lead to significant errors in the modeling results. Accordingly, it is important to consider these disadvantages when using modeling and to be careful in choosing the type of model, collecting data, and analyzing the results.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЄМНОСТІ БУДІВНИЦТВА ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Предмет дослідження цього розділу – розрахунок витрат енергії та емісії CO<sub>2</sub> під час улаштування покриття нежорсткого дорожнього одягу. Мета – обґрунтування вибору типу асфальтобетонної суміші, що має забезпечити максимальну енергоефективність та зменшення вуглецевого сліду на етапах її виготовлення, транспортування та будівництва.

Нижче наведені основні формули, за якими можна виконати розрахунок. Приклад розрахунку енергоемності будівництва дорожнього одягу наведено в додатку 1.

### 2.1 Основи передачі теплової енергії

Кількість теплової енергії, отриманої (або втраченої) тілом, по відношенню до маси тіла та зміни внаслідок цього його температури зазвичай виражається наступним рівнянням:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

де  $Q$  – кількість тепла, що передається об'єкту або втрачається ним, Дж;

$m$  – маса об'єкта, кг;

$c$  – питома теплоємність матеріалу, з якого складається об'єкт, Дж/(кг·°C);

$\Delta T$  – результуюча зміна температури об'єкта, °C.

Швидкість передачі енергії можна виразити наступним чином:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2.2)$$

де  $P$  – швидкість передачі енергії (потужність), Вт;

$\Delta t$  – зміна часу, с.

### 2.2 Енергоспоживання на різних етапах виробництва асфальтобетонної суміші

Проаналізувавши життєвий цикл виробництва асфальтобетонних сумішей для дорожніх покриттів, можна зробити висновок, що загальне споживання енергії  $E$

## CHAPTER 2. CALCULATION OF ENERGY INTENSITY OF ROAD PAVEMENT CONSTRUCTION

The subject of this section is the calculation of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions during the construction of non-rigid road pavement. The goal is to justify the choice of the type of asphalt mixture that should ensure maximum energy efficiency and reduce the carbon footprint at the stages of its production, transportation and construction.

Below are the basic formulas that can be used to perform the calculation. An example of calculating the energy intensity of pavement construction is given in Appendix 1.

### 2.1 Fundamentals of heat transfer

The amount of heat energy gained (or lost) by a body in relation to its mass and the resulting change in temperature is usually expressed by the following equation:

where  $Q$  is the amount of heat transferred to or lost by the object, J;

$m$  – mass of the object, kg;

$c$  – specific heat capacity of the material of which the object is composed, J/(kg·°C);

$\Delta T$  – resulting change in the temperature of the object, °C.

The energy transfer rate can be expressed as follows:

where  $P$  is the energy transfer rate (power), W;

$\Delta t$  – time change, s.

### 2.2 Energy consumption at different stages of asphalt mix production

After analyzing the life cycle of asphalt pavement mixtures production, it can be concluded that the total energy consumption  $E$

на етапі виготовлення можна поділити на чотири основні етапи (рівняння 2.3):

- 1) видалення пилу із заповнювача;
- 2) висушування заповнювача;
- 3) нагрівання бітуму;
- 4) змішування суміші.

during the production phase can be divided into four main stages (Equation 2.3):

- 1) dust removal from the aggregate;
- 2) drying of the aggregate;
- 3) heating of the bitumen;
- 4) mixing of the mixture.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.3)$$

де  $E$  – сумарні витрати енергії на етапі виробництва асфальтобетонної суміші, кВт·год;

$E_1$  – енергоспоживання на етапі видалення пилу зі щебеню, кВт·год;

$E_2$  – енергоспоживання на етапі висушування заповнювача, кВт·год;

$E_3$  – енергоспоживання на етапі розігріву бітуму, кВт·год;

$E_4$  – енергоспоживання на етапі змішування асфальтобетонної суміші, кВт·год;

$n = 4$  – кількість стадій.

Загальна формула споживання енергії на кожному етапі виглядає наступним чином:

where  $E$  is the total energy consumption at the stage of asphalt mix production, kW·h;

$E_1$  – energy consumption at the stage of dust removal from crushed stone, kW·h;

$E_2$  – energy consumption at the stage of aggregate drying, kW·h;

$E_3$  – energy consumption at the stage of bitumen heating, kW·h;

$E_4$  – energy consumption at the stage of mixing the asphalt mixture, kW·h;

$n = 4$  – number of stages.

The general formula for energy consumption at each stage is as follows:

$$E_i = M_i \cdot NCV_i \quad (2.4)$$

де  $M_i$  – загальне споживання електроенергії або палива на певному етапі, кВт·год або кг;

$NCV_i$  (net calorific value – чисте значення калорійності) – питома теплота згоряння (нижча теплотворна здатність) палива, яке використовується на  $i$ -ій стадії, (кВт·год)/кДж або (кВт·год)/кг (табл. 2.1).

Фактори, що впливають на споживання енергії на кожному етапі, різняться, насамперед, залежно від пори року, типу суміші та використовуваної техніки [4]. До видів енергії, що споживаються технікою, належать дизель, природний газ та електроенергія.

Для кількісної оцінки споживання різних видів енергії використовуються значення питомої теплоти згоряння (NCV) для різних джерел енергії. Ці коефіцієнти визначаються шляхом лабораторних досліджень, вимірюючи загальну кількість тепла, що виділяється під час спалювання енергії, і віднімаючи тепло, втрачене

where  $M_i$  is the total consumption of electricity or fuel at a certain stage, kW·h or kg;

$NCV_i$  – net calorific value (lower heating value) of the fuel used at the  $i$ -th stage, (kW·h)/kJ or (kW·h)/kg (Table 2.1).

The factors affecting energy consumption at each stage vary, primarily depending on the time of year, the type of mixture and the machinery used [4]. The types of energy consumed by machinery include diesel, natural gas and electricity.

To quantify the consumption of different types of energy, the net calorific values (NCV) of different energy sources is used. These values are determined through laboratory tests by measuring the total amount of heat released during the combustion of energy and subtracting the heat lost due to the evaporation of moisture and other volatile substances in the fuel. The

внаслідок випаровування вологи та інших летких речовин, що містяться в паливі. NCV в основному використовується для перетворення фізичних кількостей енергії (таких як вугілля, нафта і природний газ) у стандартні одиниці енергії для уніфікованих розрахунків і порівнянь. Найпоширеніші значення NCV наведені в табл. 2.1.

NCV is mainly used to convert physical quantities of energy (such as coal, oil and natural gas) into standard units of energy for uniform calculations and comparisons. The most common NCV values are shown in Table 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення питомої теплоти згоряння NCV для різних видів палива  
Table 2.1 – Net calorific values NCV for different types of fuel

Вид палива Fuel type	Електроенергія, (кВт·год)/кДж Electricity, (kW·h)/kJ	Дизель, (кВт·год)/кг Diesel, (kW·h)/kg	Природний газ, (кВт·год)/кг Natural gas, (kW·h)/kg
Значення NCV NCV value	1/3600	12,6	10,6

Наступні рівняння (2.5)-(2.8) отримано на основі моделі, представлені в роботі Wang C. [4].

### 2.2.1 Розрахунок енергоспоживання на етапі видалення пилу із заповнювача

Видалення пилу із заповнювача в основному покладається на використання електричної енергії, що залежить від потужності двигуна та типу суміші. Формула споживання енергії на цьому етапі виглядає наступним чином, кВт·год:

The following equations (2.5)-(2.8) are derived from the model presented in Wang C. [4].

### 2.2.1 Calculation of energy consumption at the aggregate dust removal phase

Dust removal from aggregate mainly relies on the use of electrical energy, which depends on the engine power and the type of mixture. The formula for the energy consumption at this stage is as follows, kW·h:

$$E_1 = a_1 \cdot \frac{k_{11} \cdot k_{12} \cdot N_1}{k_{13}} \cdot t_1 \quad (2.5)$$

де  $a_1$  – коефіцієнт, який враховує сезонні фактори і становить 2,855...2,966 для літа, 3,701...3,783 для зими та 3,278...3,375 для весни та осені;

$k_{11}$  – коефіцієнт втрат у лінії електропередачі, який має значення 1,05 для мідних та алюмінієвих дротів;

$k_{12}$  – коефіцієнт використання потужності, який залежить від кількості років використання обладнання;

$k_{13}$  – коефіцієнт ефективної потужності двигуна, який знаходиться в межах від 0,8 до 0,9;

$N_1$  – номінальна потужність двигуна (кВт);

$t_1$  – час видалення пилу (год).

where  $a_1$  is a coefficient that takes into account seasonal factors and is given as 2,855...2,966 for summer, 3,701...3,783 for winter, and 3,278...3,375 for spring and autumn;

$k_{11}$  – line loss coefficient, which has a value of 1,05 for copper and aluminium wires;

$k_{12}$  – capacity utilization coefficient, which varies with the number of years of mechanical use;

$k_{13}$  – effective power coefficient of the motor, which is in the range from 0,8 to 0,9;

$N_1$  – rated power of the motor (kW);

$t_1$  – aggregate dust removal time (h).

### 2.2.2 Розрахунок енергоспоживання на етапі висушування заповнювача

Стадія висушування заповнювача переважно працює за рахунок спалювання мазуту/дизельного палива або природного газу. Споживання енергії на цій стадії пов'язане з такими факторами, як пора року, вологість, температура на вході та виході, фактична продуктивність змішувального обладнання, потужність двигуна та теплота згоряння палива, кВт·год:

$$E_2 = a_2 \cdot \left[ m_2 \cdot \left( 1 - \frac{w}{100} \right) \cdot (T_{22} - T_{21}) \cdot c_1 + m_2 \cdot \frac{w}{100} \cdot (100^\circ\text{C} - T_{21}) \cdot c_2 + m_2 \cdot \frac{w}{100} \cdot (T_{22} - 100^\circ\text{C}) \cdot c_3 + k_{21} \cdot k_{22} \cdot N_2 \cdot G_2 \cdot NCV_2 \cdot t_2 \right] \quad (2.6)$$

де  $a_2$  – коефіцієнт, який залежить від типу суміші (табл. 2.2);

$m_2$  – маса заповнювача, що підлягає нагріванню (кг);

$w$  – вологість заповнювача (%);

$c_1$  – питома теплоємність заповнювача, становить 0,89 кДж/(кг·°C) або  $2,472 \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C);

$c_2$  – питома теплоємність води, становить 4,184 кДж/(кг·°C) або  $1,162 \cdot 10^{-3}$  (кВт·год)/(кг·°C);

$c_3$  – питома теплоємність водяної пари, становить 1,83 кДж/(кг·°C) або  $5,083 \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C);

$T_{21}$  – температура заповнювача на вході (°C);

$T_{22}$  – температура заповнювача на виході (°C);

$k_{21}$  – коефіцієнт втрат палива, який дорівнює 1,03;

$k_{22}$  – коефіцієнт використання потужності, що змінюється залежно від кількості років експлуатації обладнання;

$N_2$  – номінальна потужність двигуна (кВт);

$G_2$  – питома витрата палива, кг/(кВт·год), при цьому  $G_2 = 0,340$  кг/(кВт·год) для бензинових двигунів і  $G_2 = 0,270$  кг/(кВт·год) для дизельних двигунів;

$NCV_2$  – питома теплота згоряння палива, (кВт·год)/кг (табл. 2.1);

$t_2$  – час висушування заповнювача (год).

### 2.2.2 Calculation of energy consumption at the aggregate drying stage

The aggregate drying stage is predominantly powered by the combustion of heavy oil/diesel or natural gas. The energy consumption at the stage is related to factors such as seasonal impact factors, moisture content, input and output temperatures, the actual production capacity of the mixing equipment, engine power, and fuel calorific value, kW·h:

where  $a_2$  is a coefficient related to the mix type (Table 2.2);

$m_2$  – amount (mass) of aggregate that needs to be heated (kg);

$w$  – moisture content (%);

$c_1$  – specific heat capacity of the aggregate, 0,89 kJ/(kg·°C) or  $2,472 \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C);

$c_2$  – specific heat capacity of water, 4,184 kJ/(kg·°C) or  $1,162 \cdot 10^{-3}$  (kW·h)/(kg·°C);

$c_3$  – specific heat capacity of water vapor, 1,83 kJ/(kg·°C) or  $5,083 \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C);

$T_{21}$  – input temperature of the aggregate (°C);

$T_{22}$  – output temperature of the aggregate (°C);

$k_{21}$  – fuel loss coefficient, equal to 1,03;

$k_{22}$  – capacity utilization coefficient, varying with the number of years of mechanical use;

$N_2$  – rated power of the engine (kW);

$G_2$  – specific fuel consumption, kg/(kW·h), with  $G_2 = 0,340$  kg/(kW·h) for gasoline engines, and  $G_2 = 0,270$  kg/(kW·h) for diesel engines;

$NCV_2$  – net calorific value coefficient of the fuel used, (kW·h)/kg (table 2.1);

$t_2$  – aggregate drying time (h).

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів  $a_2$  і  $a_4$  для різних типів асфальтобетонних сумішей

Table 2.2 – Values of coefficients  $a_2$  and  $a_4$  for different types of asphalt concrete mixtures

Тип асфальтобетонної суміші Type of asphalt mix	SMA-13	AC-13	AC-20	AC-25
Значення коефіцієнта $a_2$ Value of the coefficient $a_2$	1,066...1,099	1,045...1,081	1,028...1,088	1,020...1,087
Значення коефіцієнта $a_4$ Value of the coefficient $a_4$	3,216...3,319	3,205...3,301	3,197...3,223	3,116...3,306

### 2.2.3 Розрахунок енергоспоживання на етапі розігріву бітуму

На споживання енергії на етапі підігріву бітуму впливають такі фактори, як початкова температура бітуму, ефективність нагрівального обладнання, тип асфальту та вид палива. Рівняння енергоспоживання на етапі розігріву бітуму виглядає наступним чином, кВт·год:

$$E_3 = a_3 \cdot [m_3 \cdot (T_{32} - T_{31}) \cdot c_4 + k_{31} \cdot k_{32} \cdot N_3 \cdot G_3 \cdot NCV_3 \cdot t_3] \quad (2.7)$$

де  $a_3$  – коефіцієнт, що враховує тип асфальтобетонної суміші, значення якого коливається в межах 7,569...8,054 для асфальтобетону, модифікованого СБС, та 8,129...8,269 для звичайного асфальтобетону;

$m_3$  – маса бітуму, що підлягає нагріванню (кг);

$T_{32}$  – температура бітуму на виході (°C);

$T_{31}$  – температура навколишнього середовища (°C);

$c_4$  – питома теплоємність бітуму, перебуває в діапазоні 0,9...1,0 кДж/(кг·°C) або  $(2,5...2,778) \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C) для звичайного асфальтобетону та 1,0...1,1 кДж/(кг·°C) або  $(2,778...3,056) \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C) для асфальтобетону, модифікованого СБС;

$k_{31}$  – коефіцієнт втрат палива, приймається рівним 1,03;

$k_{32}$  – коефіцієнт використання потужності, який змінюється залежно від кількості років експлуатації обладнання;

$N_3$  – номінальна потужність двигуна (кВт);

$G_3$  – питома витрата палива, кг/(кВт·год), дорівнює 0,200 кг/(кВт·год) для газового пальника;

### 2.2.3 Calculation of energy consumption at the asphalt (bitumen) heating phase

The energy consumption during the asphalt heating stage is influenced by such factors as the initial temperature of the asphalt, the efficiency of the heating equipment, the type of asphalt, and the type of fuel. The energy consumption equation for the asphalt heating stage is as follows, kW·h:

where  $a_3$  is a coefficient which accounts for the type of asphalt with values ranging 7,569...8,054 for SBS-modified asphalt and 8,129...8,269 for base asphalt;

$m_3$  – amount (mass) of asphalt that needs to be heated (kg);

$T_{32}$  – output temperature of the asphalt (°C);

$T_{31}$  – ambient temperature (°C);

$c_4$  – specific heat of the asphalt, with a range 0,9...1,0 kJ/(kg·°C) or  $(2,5...2,778) \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C) for base asphalt and 1,0...1,1 kJ/(kg·°C) or  $(2,778...3,056) \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C) for SBS-modified asphalt;

$k_{31}$  – fuel loss coefficient, set at 1,03;

$k_{32}$  – capacity utilization coefficient, which varies depending on the number of years the equipment has been in use;

$N_3$  – rated power of the engine (kW);

$G_3$  – specific fuel consumption, kg/(kW·h), equals to 0,200 kg/(kW·h) for gas burner;

$NCV_3$  – питома теплота згоряння палива, (кВт·год)/кг (табл. 2.1);

$t_3$  – час нагрівання бітуму (год).

#### 2.2.4 Розрахунок енергоспоживання на етапі змішування суміші

Сезонні фактори, тип суміші, марка обладнання та вид палива є основними факторами, які впливають на споживання енергії на цьому етапі, кВт·год:

$NCV_3$  – net calorific value coefficient of the fuel used, (kW·h)/kg (table 2.1);

$t_3$  – asphalt heating time (h).

#### 2.2.4 Calculation of energy consumption at the mixture blending phase

Seasonal factors, mix types, machinery models, and fuel types are the main influencing factors of energy consumption at this stage, kW·h:

$$E_4 = a_4 \cdot \frac{k_{41} \cdot k_{42} \cdot N_4}{k_{43}} \cdot t_4 \quad (2.8)$$

де  $a_4$  – коефіцієнт, який залежить від типу суміші (табл. 2.2);

$k_{41}$  – коефіцієнт втрат у лінії електропередачі, значення якого становить 1,05 для мідних та алюмінієвих дротів;

$k_{42}$  – коефіцієнт використання потужності, який залежить від кількості років експлуатації обладнання;

$k_{43}$  – коефіцієнт ефективної потужності двигуна, який перебуває в межах від 0,8 до 0,9;

$N_4$  – номінальна потужність двигуна (кВт);

$t_4$  – час перемішування суміші (год).

$k_{12} = k_{22} = k_{32} = k_{42} = 1$  для нового обладнання та  $> 1$  для старого обладнання, яка перебуває в неідеальному технічному стані та має ознаки втрати продуктивності.

### 2.3 Енергоспоживання на різних етапах будівництва дорожнього одягу

Модель розрахунку енергоспоживання, використана в цьому розділі, базується на роботі Woodrow J.H. [5].

Різні види енергії визначаються наступним чином:

– Теплота згоряння (калорійна енергія) ( $E_{cal}$ ) – теплова енергія, яка виділяється при повному спалюванні палива або іншого продукту.

– Енергія переробки ( $E_{pr}$ ) – енергія, необхідна для виробництва або іншої обробки одиниці матеріалу. Такі матеріали зазвичай використовуються як компоненти конструкції або будівельної одиниці.

– Транспортна енергія ( $E_{tr}$ ) – енергія, яка використовується у вигляді пального для транспортування матеріалів від місця їхнього

where  $a_4$  is a coefficient related to the mix type (table 2.2);

$k_{41}$  – line loss coefficient, with values of 1,05 for copper and aluminium wires;

$k_{42}$  – capacity utilization coefficient, which varies with the number of years the machinery has been in use;

$k_{43}$  – effective power coefficient of the motor, which is between 0,8 and 0,9;

$N_4$  – rated power of the engine (kW);

$t_4$  – mixing time for the mixture (h).

$k_{12} = k_{22} = k_{32} = k_{42} = 1$  for new machinery and  $> 1$  for older machinery not in a perfect technical condition with signs of productivity loss.

### 2.3 Energy consumption at different stages of pavement construction

The energy consumption calculation model used in this section is based on Woodrow J.H. [5].

The various types of energy are defined as follows:

– Calorific energy ( $E_{cal}$ ) – the heat energy released when a fuel or other product is completely burned.

– Processing energy ( $E_{pr}$ ) – the energy required to manufacture or otherwise process a unit of material. Such materials will usually be used as components of a structure or unit of construction.

– Transport energy ( $E_{tr}$ ) – the energy used as fuel for transporting materials from the

походження або виробництва до місця використання.

– Будівельна енергія ( $E_c$ ) – енергія, яка використовується як паливе (включаючи електричну енергію) для роботи будівельної техніки. Для будівництва автомобільних доріг це бетонозмішувальні установки, конвеєри, укладальники, котки тощо.

### 2.3.1 Вихідні дані

Основні дані для розрахунку: вміст бітуму в суміші; вміст вологи в заповнювачі; відстань транспортування бітуму, заповнювача та суміші; коефіцієнт ущільнення основи дорожнього покриття; енергія для нагрівання та висушування заповнювача.

### 2.3.2 Розрахунок

Витрати енергії в цьому розділі вимірюється в л/(км·см), що являє собою дизельний еквівалент енергії, необхідної для виконання роботи з улаштування шару дорожнього покриття довжиною 1 км, шириною 7,32 м (24 фути) і товщиною 1 см.

#### Будівельна енергія

Видалення пилу та висушування заповнювача, л/(км·см):

point of their origin or manufacture to the point of their use.

– Construction energy ( $E_c$ ) – the energy used as fuel (including electrical energy) in operating construction equipment. For highway construction this includes mixing plants, conveyors, distributors, rollers, etc.

### 2.3.1 Input data

The main data for the calculation: content of asphalt (bitumen) in a mixture; moisture content in aggregate; transportation distance of asphalt, aggregate and mixture; compaction factor for a base of road pavement; energy for heating and drying aggregate.

### 2.3.2 Calculations

Energy consumption in this section is measured in l/(km·cm) which represents a diesel equivalent of energy needed for performing a certain work on a pavement layer of 1 km long, 7.32 m (24 ft) wide and 1 cm thick.

#### Construction energy

Dust removal and drying of aggregate, l/(km·cm):

$$E_{c\_dust\_dry\_aggr} = CF_{base} \cdot \left(1 - \frac{C_{asph}}{100}\right) \cdot SE_{dust\_dry\_aggr} \quad (2.9)$$

де  $CF_{base}$  – коефіцієнт ущільнення основи дорожнього одягу, кг/(км·см);

$C_{asph}$  – вміст асфальту (бітуму) в суміші, %;

$SE_{dust\_dry\_aggr}$  – питома енергія на видалення пилу та висушування заповнювача, л/кг:

where  $CF_{base}$  – compaction factor for a base of road pavement, kg/(km·cm);

$C_{asph}$  – content of asphalt (bitumen) in a mixture, %;

$SE_{dust\_dry\_aggr}$  – specific energy for dust removal and drying of aggregate, l/kg:

$$SE_{dust\_dry\_aggr} = \frac{E_1 + E_2}{1000 \cdot NCV_d \cdot \rho_d} \quad (2.10)$$

де  $\rho_d = 0,84$  кг/л – густина дизельного палива при 15 °C;

1000 – для переведення з тонн у кілограми;

$E_1, E_2$  та  $NCV_d$  – див. розділ 2.2.

$SE_{dust\_dry\_aggr}$  можна також отримати з додатку 6.

Нагрівання та змішування асфальту, л/(км·см):

where  $\rho_d = 0,84$  kg/l – density of diesel fuel at 15 °C;

1000 – to convert from tonnes to kilograms;

for  $E_1, E_2$  and  $NCV_d$  – see section 2.2.

$SE_{dust\_dry\_aggr}$  may alternatively be obtained from Appendix 6.

Heating and mixing of asphalt, l/(km·cm):

$$E_{heat\_mix} = \frac{CF_{base} \cdot SE_{heat\_mix}}{CE_{fuel}} \quad (2.11)$$

де  $CE_{fuel}$  – теплота згоряння (калорійна енергія) палива, що використовується для змішування, кДж/л або (кВт·год)/л;

$SE_{heat\_mix}$  – питома енергія нагрівання та змішування, кДж/кг;

where  $CE_{fuel}$  – calorific energy of fuel used for mixing, kJ/l or (kW·h)/l;

$SE_{heat\_mix}$  – specific energy for heating and mixing, kJ/kg;

$$SE_{heat\_mix} = \frac{E_3 + E_4}{1000} \cdot 3600 \quad (2.12)$$

де 3600 – для перерахунку з кВт·год у кДж (якщо  $E_3$  та  $E_4$  розраховуються в кВт·год).

$SE_{heat\_mix}$  можна також отримати з додатку 7.

Укладання та ущільнення, л/(км·см):

where 3600 – conversion from kW·h to kJ (when  $E_3$  and  $E_4$  are calculated in kW·h).

$SE_{heat\_mix}$  may alternatively be obtained from Appendix 7.

Spreading and compacting, l/(km·cm):

$$E_{c\_spr\_comp} = \frac{CF_{base} \cdot SE_{spr\_comp}}{CE_{fuel}} \quad (2.13)$$

де  $SE_{spr\_comp}$  – питома енергія укладання та ущільнення суміші, кДж/кг або (кВт·год)/кг (Woodrow J.H., с.15 [5]);

$CE_{fuel}$  – теплота згоряння (калорійна енергія) палива (дизель), яке використовується для укладання та ущільнення, кДж/л або (кВт·год)/л.

Загальна будівельна енергія, л/(км·см):

where  $SE_{spr\_comp}$  – specific energy for spreading and compacting of a mix, kJ/kg or (kW·h)/kg (Woodrow J.H., p.15 [5]);

$CE_{fuel}$  – calorific energy of fuel (diesel) used for spreading and compacting, kJ/l or (kW·h)/l.

Total construction energy, l/(km·cm):

$$E_{c\_total} = E_{c\_heat\_dry\_aggr} + E_{c\_mix} + E_{c\_spr\_comp} \quad (2.14)$$

Транспортна енергія  
Асфальт (бітум), л/(км·см):

Transport energy  
Asphalt, l/(km·cm):

$$E_{tr\_asph} = CF_{base} \cdot \frac{C_{asph}}{100} \cdot D_{asph} \cdot 2 \cdot FU_{asph} \quad (2.15)$$

де  $D_{asph}$  – відстань перевезення асфальту (бітуму), км;

$FU_{asph}$  – витрати пального вантажними автомобілями під час перевезення асфальту (бітуму), л/(кг·км) (додаток 8).

where  $D_{asph}$  – transportation distance of asphalt (bitumen), km;

$FU_{asph}$  – fuel use by trucks during asphalt hauling, l/(kg·km) (Appendix 8).

Заповнювач, л/(км·см):

Aggregate, l/(km·cm):

$$E_{tr\_aggr} = CF_{base} \cdot \left(1 - \frac{C_{asph}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{w_{aggr}}{100}\right) \cdot D_{aggr} \cdot 2 \cdot FU_{aggr} \quad (2.16)$$

де  $w_{aggr}$  – вологість заповнювача, %;

where  $w_{aggr}$  – moisture content in aggregate, %;

$D_{aggr}$  – відстань перевезення заповнювача, км;

$D_{aggr}$  – transportation distance of aggregate, km;

$FU_{aggr}$  – витрати пального вантажними автомобілями під час перевезення заповнювача, л/(кг·км) (додаток 8).

$FU_{aggr}$  – fuel use by trucks during aggregate hauling, l/(kg·km) (Appendix 8).

Суміш, л/(км·см):

Mix, l/(km·cm):

$$E_{tr\_mix} = CF_{base} \cdot D_{mix} \cdot 2 \cdot FU_{mix} \quad (2.17)$$

де  $D_{mix}$  – відстань перевезення асфальтобетонної суміші, км;

where  $D_{mix}$  – transportation distance of asphalt mixture, km;

$FU_{mix}$  – витрати пального вантажними автомобілями під час перевезення суміші, л/(кг·км) (додаток 8).

$FU_{mix}$  – fuel use by trucks during mixture hauling, l/(kg·km) (Appendix 8).

Загальна транспортна енергія, л/(км·см):

Total transport energy, l/(km·cm):

$$E_{tr\_total} = E_{tr\_asph} + E_{tr\_aggr} + E_{tr\_mix} \quad (2.18)$$

Енергія переробки  
Заповнювач, л/(км·см):

Processing energy  
Aggregate, l/(km·cm):

$$E_{pr\_aggr} = CF_{base} \cdot \left(1 - \frac{C_{asph}}{100}\right) \cdot \frac{PE_{aggr}}{CE_{fuel}} \quad (2.19)$$

де  $PE_{aggr}$  – питома енергія переробки заповнювача, кДж/кг або (кВт·год)/кг (додаток 9);

where  $PE_{aggr}$  – specific processing energy of aggregate, kJ/kg or (kW·h)/kg (Appendix 9);

$CE_{fuel}$  – теплота згоряння (калорійна енергія) палива, яке використовується для переробки заповнювача (дизель), кДж/л або (кВт·год)/л.

$CE_{fuel}$  – calorific energy of fuel used for processing aggregate (diesel), kJ/l or (kW·h)/l.

Асфальт (бітум), л/(км·см):

Asphalt, l/(km·cm):

$$E_{pr\_asph} = CF_{base} \cdot \frac{C_{asph}}{100} \cdot \frac{PE_{asph}}{CE_{fuel}} \quad (2.20)$$

де  $PE_{asph}$  – питома енергія переробки асфальту (бітуму), кДж/кг або (кВт·год)/кг (додаток 9);

where  $PE_{asph}$  – specific processing energy of asphalt, kJ/kg or (kW·h)/kg (Appendix 9);

$CE_{fuel}$  – теплота згоряння (калорійна енергія) палива, яке використовується для

processing asphalt (diesel), kJ/l or (kW·h)/l.

переробки асфальту (дизель), кДж/л або (кВт·год)/л.

Загальна енергія переробки, л/(км·см):

Total processing energy, l/(km·cm):

$$E_{pr\_total} = E_{pr\_aggr} + E_{pr\_asph} \quad (2.21)$$

Теплота згоряння (калорійна енергія) Асфальт (бітум), л/(км·см):

Calorific energy Asphalt, l/(km·cm):

$$E_{cal\_asph} = CF_{base} \cdot \frac{C_{asph}}{100} \cdot \frac{CE_{asph}}{CE_{fuel}} \quad (2.22)$$

де  $CE_{asph}$  – теплота згоряння асфальтобетону, кДж/кг або (кВт·год)/кг;

$CE_{fuel}$  – теплота згоряння палива (дизельного), що використовується для обробки асфальтобетону, кДж/л або (кВт·год)/л (додаток 9).

where  $CE_{asph}$  – calorific energy of asphalt, kJ/kg or (kW·h)/kg;

$CE_{fuel}$  – calorific energy of fuel (diesel) used for processing asphalt, kJ/l or (kW·h)/l (Appendix 9).

**ПРИМІТКА:** у рівняннях вище «100» в знаменнику – для переведення відсотків у частки одиниці.

**NOTE:** in equations above “100” in denominator converts from a percent unit to a decimal number.

## 2.4 Розрахунок викидів CO<sub>2</sub>

## 2.4 Calculating CO<sub>2</sub> emissions

Викиди парникових газів (ПГ) вимірюються в грамах еквіваленту двоокису вуглецю на кіловат-годину (г CO<sub>2</sub>/кВт·год). Еквівалент вуглекислого газу – це міра, яка використовується для порівняння викидів різних парникових газів. Показники викидів можуть суттєво відрізнятися для кожного типу палива. Це пов'язано з тим, що ефективність викопних видів палива змінюється залежно від того, наскільки ефективні електростанції та як видобувається паливо.

Greenhouse gasses (GHG) emissions are measured in grams of carbon dioxide equivalent per kilowatt hour (g CO<sub>2</sub>/kW·h). Carbon dioxide equivalent is a measure used to compare emissions of different greenhouse gases. The numbers for emissions may differ significantly for each fuel type. The reason is that the efficiency of fossil fuels varies, depending on how efficient the power plants are and how the fuel is extracted.

Щоб визначити вуглецевий слід (емісію)  $CE$  (кг CO<sub>2</sub>) від споживання енергії, потрібно помножити спожиту енергію  $E$  (кВт·год) на питомі викиди двоокису вуглецю (вуглецеву інтенсивність)  $CI$  цього джерела енергії (кг CO<sub>2</sub>/кВт·год):

To determine the carbon footprint  $CE$  (kg CO<sub>2</sub>) from the energy consumption, you need to multiply consumed energy  $E$  (kW·h) by the carbon intensity  $CI$  of that energy source (kg of CO<sub>2</sub> per kW·h):

$$CE = E \cdot CI \quad (2.23)$$

$CI$  можна отримати з табл. 2.3.

$CI$  can be obtained from table 2.3.

Таблиця 2.3 – Викиди CO<sub>2</sub> від різних джерел енергії  
 Table 2.3 – CO<sub>2</sub> emissions from different energy sources

Джерело енергії Energy source	Питомі викиди (вуглецева інтенсивність) <i>CI</i> , кг CO <sub>2</sub> /(кВт·год) Specific emissions (carbon intensity) <i>CI</i> , kg CO <sub>2</sub> /(kW·h)	Джерело даних Data source
Електрика (Electricity)	0,260	[6]
Дизель (Diesel)	0,267	[7]
Природний газ (Natural gas)	0,201	[7]

### РОЗДІЛ 3. АГРЕГАТИ АСФАЛЬТО-ЗМІШУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ТА ЕНЕРГІЯ, ЩО СПОЖИВАЄТЬСЯ ЗАВОДОМ

Оскільки в структурі будівельних робіт з улаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу найбільшою часткою з точки зору енерговитрат (понад 50 %) є приготування асфальтобетонних сумішей, наступні розділи присвячені методам та заходам забезпечення енергоефективності на етапі виготовлення матеріалів.

#### 3.1 Складування та зберігання матеріалів

Заповнювач різних розмірів повинен зберігатися роздільно, складений горизонтальними шарами або шарами, що мають невеликий ухил. Під час вантажно-розвантажувальних робіт слід стежити за тим, щоб сегрегація (поділ) заповнювача була мінімальною. Якщо сегрегація все-таки відбувається, то слід перемішати такий заповнювач перед його завантаженням у бункери агрегатів живлення. Діяти треба обережно, щоб ще більше не посилити цей негативний ефект.

Заповнювач необхідно зберігати на чистій, сухій, рівній і твердій поверхні, оберігаючи його від потрапляння сторонніх матеріалів. Треба стежити, щоб заповнювач не покривався пилом. Склади мають бути забезпечені водовідведенням, щоб мати сухий заповнювач. Підвищена вологість, особливо дрібного заповнювача, збільшує час його просушування в сушильному барабані, що призводить до зниження продуктивності установки. Вологість заповнювача кожного виду необхідно перевіряти двічі на день і враховувати її під час вибору режиму сушильного барабана.

Якщо витрату тепла на нагрівання матеріалу від 10 до 160 °C прийняти за 100 %, то кожен відсоток вологи в матеріалі вимагає збільшення витрати тепла на його сушіння на 20 %.

За постійної теплової потужності форсунок і топкового агрегату збільшення вологості матеріалу веде до різкого зниження продуктивності. За даними фірми Wacklesy-Seeley (США), продуктивність установок

### CHAPTER 3. ASPHALT MIXING PLANT UNITS AND ENERGY CONSUMPTION BY THE PLANT

Considering that asphalt mixtures account for the largest share of energy consumption (over 50 %) in the structure of construction works on asphalt pavement layers, the following sections are devoted to methods and measures to ensure energy efficiency at the stage of material preparation.

#### 3.1 Warehousing and storage of materials

Aggregates of different sizes should be stored separately, stacked in horizontal layers or layers with a slight slope. During loading and unloading operations, ensure that segregation (separation) of the aggregate is kept to a minimum. If segregation does occur, mix the aggregate before loading it into the hoppers of the power units. Care must be taken not to aggravate this negative effect further.

The aggregate must be stored on a clean, dry, flat and hard surface, protected from foreign material. Make sure that the aggregate is not covered with dust. Warehouses should be provided with drainage to ensure that the aggregate is dry. Increased moisture content, especially of fine aggregate, increases the drying time in the drying drum, which leads to a decrease in plant productivity. The moisture content of each type of aggregate should be checked twice a day and taken into account when selecting the drying drum mode.

If the heat consumption for heating the material from 10 to 160 °C is assumed to be 100 %, then each percentage of moisture in the material requires a 20 % increase in the heat consumption for drying it.

Given a constant heat output of the nozzle and the furnace unit, an increase in the moisture content of the material leads to a sharp decrease in productivity. According to the data of Wacklesy-Seeley (USA), the productivity of plants depending on the

залежно від вологості мінерального заповнювача наведено в таблиці 3.1.

### 3.2 Агрегати живлення

Агрегати живлення забезпечують подачу матеріалів у сушильний барабан у співвідношенні, заданому складом суміші. У баштових установках головним дозувальним елементом є ваговий дозатор гарячих матеріалів, що забезпечує дозування піску і щебеню з похибкою  $\pm 3\%$  і дозування мінерального порошку з похибкою  $\pm 3,5\%$ .

Для подачі матеріалів у сушильно-змішувальні барабани використовуються виключно агрегати живлення з автоматичними дозаторами. Система управління агрегатом живлення дає змогу з пульта змінювати продуктивність як окремих дозаторів для зміни рецептури суміші, так і пропорційну зміну продуктивності всіх дозаторів і АС установки загалом.

moisture content of the mineral aggregate is shown in Table 3.1.

### 3.2 Feeding units

Feeding units ensure the supply of materials to the drying drum in the ratio specified by the composition of the mixture. In tower plants, the main dosing element is a weighing batcher for hot materials, which ensures the dosing of sand and crushed stone with an error of  $\pm 3\%$  and the dosing of mineral powder with an error of  $\pm 3,5\%$ .

The materials are fed into the drying and mixing drums exclusively by feeding units with automatic dosing devices. The control system of the power supply unit allows you to change the capacity of individual dosing units to change the mixture recipe, as well as proportional changes in the capacity of all dosing units and the AC system as a whole.

Таблиця 3.1 – Продуктивність установок залежно від вологості мінерального заповнювача

Table 3.1– Productivity of plants depending on the moisture content of the mineral aggregate

Діаметр і довжина сушильно-змішувального барабана, мм Diameter and length of the drying and mixing drum, mm	Продуктивність установки (т/год) при вологості заповнювачві, % Plant capacity (t/h) at aggregate moisture content, %								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1524 x 6705	178	140	116	100	84	79	74	63	58
1830 x 7315	278	220	178	158	137	121	116	100	89
2134 x 9144	420	336	273	236	205	184	163	147	137
2438 x 9754	541	430	352	305	263	236	210	194	173
2743 x 10973	719	578	478	410	357	315	284	257	236
3050 x 12192	956	761	630	541	473	430	378	341	315

Налаштування і періодичний контроль дозаторів (тарування) здійснюються установкою перекидного лотка і подачею матеріалу певної фракції в тарувальний ківш. За часом і масою набраного в ківш матеріалу розраховується фактична продуктивність даного живильника і, за необхідності, проводиться коригування системи автоматичного дозування.

Недолік цих дозаторів полягає в неузгодженості між одночасним дозуванням усіх компонентів і різночасовим їх введенням у змішувальну камеру; бітум вводиться в момент дозування (затримка – частки

Setting up and periodic control of the dosing units (taring) is carried out by installing a tipping tray and feeding the material of a certain fraction into the taring bucket. Based on the time and weight of the material collected in the bucket, the actual capacity of this feeder is calculated and, if necessary, the automatic dosing system is adjusted.

The disadvantage of these dosing units is the inconsistency between the simultaneous dosing of all components and their simultaneous introduction into the mixing chamber; bitumen is introduced at the time of dosing (delay – fractions of a second), mineral

секунди), мінеральний порошок вводиться із затримкою 0,5...1,2 секунди, а пісок і щебінь надходять у змішувальну камеру через 2...3 хвилини. Усе це впливає на якість суміші, що випускається, особливо в періоди її пуску, зупинок і зміни складу суміші.

### **3.3 Бітумосховища та бітумонагрівачі**

Бітумосховища великої місткості будуються в умовах неритмічної або з великою періодичністю доставки бітуму. Якщо є небезпека обводнення бітуму, то підтримувати бітум у сховищі за робочої температури неекономічно. Раціональніше в таких випадках зберігати бітум за температури навколишнього середовища, а в зоні місцевого обігріву доводити його до температури перекачування (~90 °C) насосами в бітумонагрівальні котли (бітумонагрівачі), де він зневоднюється, модифікується, покращується різними ПАР і доводиться до робочої температури.

Необхідно мати на увазі, що випарювання вологи дуже енергоємний і тривалий процес. Кожен відсоток вологи, що міститься в бітумі, збільшує витрату енергії і час підготовки бітуму на 20 %.

В умовах короткоперіодичної і ритмічної доставки бітуму для його зберігання застосовують інвентарні резервуари з обігрівом і теплоізоляцією, в яких бітум зберігається короткочасно при робочій температурі. Як бітумонагрівачі використовуються горизонтальні циліндричні резервуари місткістю від 10 до 25 т.

Як джерела тепла для підтримання робочої температури бітуму можуть використовуватися: змійовикові підігрівачі з паровим або масляним теплоносієм, трубчасті підігрівачі з газовим (вогневим) теплоносієм і електричні підігрівачі.

Під час вибору системи нагрівання бітуму необхідно виходити зі ступеня її впливу на властивості бітумів. За високої температури теплообмінних апаратів на їхній поверхні відбувається деструкція асфальтенів із виділенням легких вуглеводнів та утворенням твердих високовуглецевих з'єднань – карбенів і карбодідів, що негативно впливають на здатність бітуму прилипати до поверхні мінеральних матеріалів. Отже, що

powder is introduced with a delay of 0.5...1.2 seconds, and sand and gravel enter the mixing chamber after 2...3 minutes. All of this affects the quality of the produced mixture, especially during periods of start-up, shutdown and changes in the composition of the mixture.

### **3.3 Bitumen storage facilities and bitumen heaters**

Large-capacity bitumen storage facilities are built in conditions of irregular or frequent bitumen delivery. If there is a risk of bitumen watering, it is uneconomical to keep the bitumen in the storage facility at operating temperature. In such cases, it is more rational to store bitumen at ambient temperature and, in the local heating zone, bring it to the pumping temperature (~90 °C) by pumps to bitumen heating boilers (bitumen heaters), where it is dehydrated, modified, improved with various surfactants and brought to the operating temperature.

It should be borne in mind that moisture evaporation is a very energy-intensive and time-consuming process. Each percentage of moisture contained in bitumen increases energy consumption and bitumen preparation time by 20 %.

In the context of short-period and rhythmic bitumen delivery, heated and insulated inventory tanks are used for its storage, where bitumen is stored for a short time at operating temperature. Horizontal cylindrical tanks with a capacity of 10 to 25 tonnes are used as bitumen heaters.

The following heat sources can be used to maintain the working temperature of bitumen: coil heaters with steam or oil coolant, tube heaters with gas (fire) coolant and electric heaters.

When selecting a bitumen heating system, the degree of its influence on bitumen properties must be taken into account. At high temperatures of heat exchangers, asphaltenes are destroyed on their surfaces with the release of light hydrocarbons and the formation of solid high-carbon compounds – carbenes and carbides – which negatively affect the ability of bitumen to adhere to the surface of mineral materials. Thus, the lower the temperature of

нижча температура теплоносія і стінок теплообмінного апарату, то м'якше нагрівання і менший його негативний вплив на бітум.

Перевага пари як теплоносія полягає в її низькій температурі (не вище 200 °C) і найменшому негативному впливі на бітум навіть за тривалого впливу.

Недоліки пари також полягають у її низькій температурі, малому перепаді температури між теплообмінником і бітумом і великій площі теплообмінників, тривалому нагріву та низькому ККД, частій втраті герметичності й обводненні бітуму.

Перевага масла як теплоносія: «м'який» нагрів (270... 320 °C) і менша площа змійовиків, а також високий ККД. Нагрівання масла можна вести газовим (вогневим) і електричними нагрівачами.

Недоліки масляного обігріву – в його пожежонебезпеці. Застосування замість мастила спеціальних високотемпературних органічних теплоносіїв вимагає забезпечення високої герметичності, оскільки вони мають високу токсичність.

Трубчасті підігрівачі (теплообмінники) з вогневим підігрівом виготовляють двох типів: гарячі гази в трубах, занурених у бітум (жарові труби); бітум у трубах, що обігриваються гарячими газами.

Нагрівачі бітуму з жаровими трубами прості в конструктивному виконанні, надійні в експлуатації, але пожежонебезпечні і створюють жорсткий режим нагріву. Нагрівачі з жаровими трубами застосовують в автогудронаторах і автобітумовозах і використовують виключно для підтримання робочої температури бітуму (короткочасний підігрів). Трубчасті розігрівачі другого типу мають дуже жорсткий режим нагріву, в них висока швидкість утворення карбенів і карбоїдів і можливе навіть відкладення коксу на стінках труб, через що в їхніх конструкціях передбачається можливість очищення внутрішньої поверхні труб механічними способами.

Електричні нагрівачі прості за конструкцією, надійні в експлуатації і можуть бути прямої дії (відкрита спіраль занурена в бітум) і непрямої дії (спіралі з ізоляторами розташовані в трубах). Нагрівачі прямої дії створюють дуже жорсткий режим нагріву бітуму (мала площа спіралі за великої

the heat carrier and the walls of the heat exchanger, the milder the heating and the lesser its negative impact on bitumen.

The advantage of steam as a heat transfer medium is its low temperature (no higher than 200 °C) and the least negative impact on bitumen, even with prolonged exposure.

The disadvantages of steam are its low temperature, low temperature difference between the heat exchanger and bitumen and large heat exchanger area, prolonged heating and low efficiency, frequent loss of tightness and watering of the bitumen.

The advantage of oil as a heat carrier: “soft” heating (270...320 °C) and smaller coil area, as well as high efficiency. Oil can be heated with gas (fire) and electric heaters.

The disadvantage of oil heating is its fire hazard. The use of special high-temperature organic heat transfer fluids instead of oil requires high tightness, as they are highly toxic.

Tubular heaters (heat exchangers) with fire heating are made of two types: hot gases in pipes immersed in bitumen (flame pipes); bitumen in pipes heated by hot gases.

Bitumen heaters with flame tubes are simple in design, reliable in operation, but fire hazardous and create a rigid heating mode. Heaters with flame tubes are used in tar trucks and bitumen trucks and are used exclusively to maintain the working temperature of bitumen (short-term heating). Tubular heaters of the second type have a very rigid heating regime, they have a high rate of carbon and carbide formation and even coke deposits on the pipe walls, which is why their designs provide for the possibility of cleaning the inner surface of the pipes by mechanical means.

Electric heaters are simple in design, reliable in operation and can be direct-acting (an open coil immersed in bitumen) and indirect-acting (coils with insulators located in pipes). Direct-acting heaters create a very rigid bitumen heating regime (small coil area at high power), and their use is highly undesirable.

потужності), і їх застосування вкрай небажане. Нагрівачі непрямой дії за термічним впливом на бітум дещо жорсткіші, ніж жарові труби, але набагато м'якші, ніж нагрівачі прямої дії. Електричні нагрівачі пожежонебезпечні та мають низьку економічність.

У світовій практиці найчастіше застосовують комбіновані системи нагріву, що складаються з двох ступенів. У першому ступені проводиться нагрів масла, де використовуються трубчасті нагрівачі з вогневим підігрівом або електричні з непрямим нагріванням, як другий ступінь слугує масляний змішувальний нагрівач-теплообмінник у бітумній цистерні.

Практика експлуатації трубчастих теплообмінників засвідчила, що в разі масляного теплоносія площа теплопередавальної поверхні має становити 0,5... 1 м<sup>2</sup> на кожен тонну місткості цистерни. У разі використання гладких труб для забезпечення цієї умови потрібна велика довжина труб, що веде до зниження надійності, підвищення металоємності, зниження корисного об'єму цистерни.

Найдоцільніше робити теплообмінники з оребрених труб із внутрішнім діаметром 50...75 мм, які забезпечують низький опір руху олії, що подається безперервно з нагрівача насосом.

Бітум, нагрітий у котлах до робочої температури, слід використовувати протягом 5 год. За необхідності більш тривалого зберігання температуру в'язкого бітуму необхідно знизити до 80 °С, рідкого – до 60 °С і зберігати не більше 12 год.

Бітум із додаванням ПАР, полімерів, розріджувачів (пластифікаторів) або структуроутворювальних компонентів слід перемішувати до отримання однорідної суміші в окремій місткості, обладнаній паро-, електро- або олійнопідігрівом і насосною установкою. Готове в'язке перекачують у видаткову ємність і нагрівають до робочої температури.

### 3.4 Сушильні барабани установок

Сушіння і нагрівання матеріалів у сушарках барабанного типу широко застосовуються в різних галузях. Під час обертання похилого барабана матеріал піднімається лопатями і скидається в потік

Indirect heaters are somewhat more severe than heat pipes in terms of thermal impact on bitumen, but much milder than direct heaters. Electric heaters are fire hazardous and have low efficiency.

In world practice, combined heating systems consisting of two stages are most often used. The first stage involves heating the oil, where tubular heaters with fire heating or electric heaters with indirect heating are used, and the second stage is an oil coil heater-heat exchanger in a bitumen tank.

The practice of operating tubular heat exchangers has shown that in the case of an oil coolant, the heat transfer surface area should be 0.5...1 m<sup>2</sup> per tonne of tank capacity. In the case of smooth pipes, this condition requires a large length of pipe, which leads to reduced reliability, increased metal consumption, and a reduction in the useful volume of the tank.

It is most expedient to make heat exchangers from finned pipes with an internal diameter of 50...75 mm, which provide low resistance to the movement of oil supplied continuously from the heater by a pump.

Bitumen heated to operating temperature in boilers should be used within 5 hours. If longer storage is required, the temperature of viscous bitumen should be reduced to 80 °C, liquid bitumen – to 60 °C and stored for no more than 12 hours.

Bitumen with the addition of surfactants, polymers, diluents (plasticisers) or structure-forming components should be mixed until a homogeneous mixture is obtained in a separate container equipped with steam, electric or oil heating and a pumping unit. The finished binder is pumped into the delivery container and heated to the working temperature.

### 3.4 Drying drums of installations

Drying and heating of materials in drum-type dryers are widely used in various industries. During the rotation of the inclined drum, the material is lifted by the blades and thrown into the stream of hot gases. Heat

гарячих газів. Передача тепла від газу до матеріалу здійснюється радіаційним випромінюванням полум'я і за рахунок конвективного теплообміну. За високої щільності пилу (як завіса) він поглинає значну частку радіаційного випромінювання, і основна маса матеріалу нагрівається конвективним теплообміном.

Поглинання тепла матеріалом здійснюється через відкриту до газу поверхню матеріалу, що лежить на стінках барабана і на лопатях, а також через сумарну поверхню частинок, що падають із полиць барабана. Кількість тепла, що передається на відкриту поверхню матеріалу, а також стінками барабана і лопатями, незначна, зважаючи на малу площу зіткнення і знижену температуропровідність пористого матеріалу. Водночас кількість тепла, що передається через сумарну поверхню падаючих частинок у середовищі гарячих газів, досить велика, зважаючи на велику їхню площу.

У середньому ефективність передачі тепла падаючому потоку матеріалу в 70 разів вища, ніж матеріалу, що лежить на елементах сушильного барабана.

Для підвищення ефективності роботи (продуктивності) сушильного барабана необхідно забезпечити хорошу завісу (розподіл по поперечному перерізу барабана) з падаючих матеріалів і збільшити їх долю в гарячому потоці газу, а також збільшити частоту скидання матеріалу в потоці гарячого газу.

У конструктивному відношенні барабан являє собою сталеву трубу постійного діаметру (рис. 3.1, а), де умовно можна виділити три технологічні зони: I – зона підігріву матеріалу і вологи від початкової їхньої температури до температури інтенсивного випаровування вологи ( $\approx 100$  °C); II – зона випаровування вологи та підігріву парів води до температури димових газів; III – зона нагріву матеріалів до робочої температури.

До верхнього торця барабана 1 приєднано торцеве кільце 2, що запобігає пересипанню завантаженого матеріалу. До торцевого кільця 2 примикають відгрібаючі лопаті 3, встановлені до осі барабана під кутом  $\approx 50\text{...}60^\circ$  і призначені для інтенсивного зміщення завантаженого матеріалу від торцевого кільця 2.

transfer from the gas to the material is carried out by the radiation of the flame and by convective heat exchange. At high dust density (as a curtain), it absorbs a significant portion of the radiation, and the bulk of the material is heated by convective heat exchange.

Heat absorption by the material is carried out through the surface of the material open to the gas, lying on the walls of the drum and on the blades, as well as through the total surface of the particles falling from the shelves of the drum. The amount of heat transferred to the open surface of the material, as well as through the walls of the drum and blades, is insignificant, due to the small contact area and reduced thermal conductivity of the porous material. At the same time, the amount of heat transferred through the total surface of the falling particles in the hot gas environment is quite large, given their large area.

On average, the efficiency of heat transfer to the falling flow of material is 70 times higher than that of the material lying on the elements of the drying drum.

To increase the efficiency (productivity) of the drying drum, it is necessary to ensure a good curtain (distribution along the cross-section of the drum) of the falling materials and increase their fate in the hot gas flow, as well as increase the frequency of dropping the material into the hot gas flow.

In terms of construction, the drum is a steel pipe of constant diameter (Figure 3.1, a), where three technological zones can be conditionally distinguished: I – the zone of heating the material and moisture from their initial temperature to the temperature of intensive moisture evaporation ( $\approx 100$  °C); II – the zone of moisture evaporation and heating of water vapour to the flue gas temperature; III – the zone of heating the materials to the operating temperature.

An end ring 2 is attached to the upper end of the drum 1 to prevent overfilling of the loaded material. The end ring 2 is adjacent to the raking blades 3, which are mounted to the drum axis at an angle of  $\approx 50\text{...}60^\circ$  and are designed to intensively shift the loaded material away from the end ring 2.

Далі по осі барабана розташовані підйомно-скидні лопаті 4, різні як за формою, так і за кількістю для I, II і III зон.

У зоні I частіше встановлюють плоскі, радіально розташовані лопаті (рис. 3.1, б). Вони можуть бути вигнуті по середній лінії на 15...20°, можливе їхнє відхилення від радіального напрямку в бік обертання до 15°.

Further along the drum axis, there are lifting and discharge blades 4, which differ in shape and number for zones I, II and III.

In zone I, flat, radially arranged blades are more often installed (Figure 3.1, b). They can be curved along the center line by 15...20°, and can deviate from the radial direction towards rotation by up to 15°.

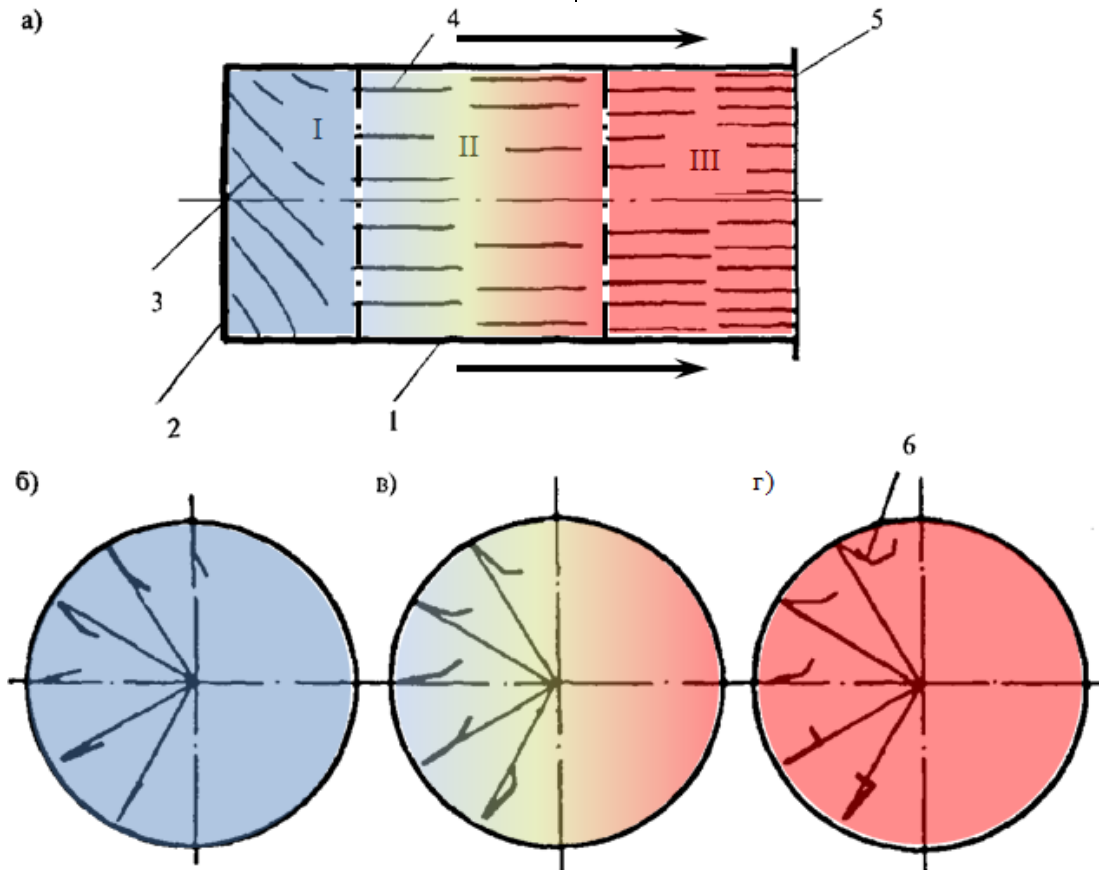


Рисунок 3.1 – Сушильний барабан із лопатями: а – сушильний барабан; б – типи лопатей першої зони; в – типи лопатей другої зони; г – типи лопатей третьої зони; 1 – корпус барабана; 2 – торцеве протипересипне кільце; 3 – лопаті, що відгрібають; 4 – лопаті, які піднімають і скидають; 5 – кільце жорсткості; 6 – лопать типу «закритий ківш» для зони довгого факела. Стрілки на рисунку вказують напрямок руху мінеральних матеріалів.

У зоні II частіше встановлюють лопаті, відхилені за ходом руху від радіального напрямку на 10...25° з козирком завширшки 20...40 мм (рис. 3.1, в), відхиленням від площини лопаті під кутом 30...40°.

У зоні III можна встановлювати лопаті, подібні до зони II (рис. 3.1, г), але з ширшим козирком і кутом установки 60...75°.

Figure 3.1 – Drying drum with blades: a – drying drum; b – types of blades of the first zone; c – types of blades of the second zone; d – types of blades of the third zone; 1 – drum body; 2 – end anti-spill ring; 3 – raking blades; 4 – lifting and discharging blades; 5 – stiffening ring; 6 – “closed bucket” blade for the long flame zone. The arrows in the figure indicate the direction of movement of mineral materials.

In zone II, blades are more often installed that are deviated from the radial direction by 10...25° with a 20...40 mm wide canopy (Figure 3.1, c), deviated from the blade plane at an angle of 30...40°.

In Zone III, blades similar to Zone II can be installed (Figure 3.1, d), but with a wider canopy and an installation angle of

Найчастіше, як лопаті в зоні III використовують швелери з висотою стінки 0,08...0,12 діаметра барабана.

Кількість лопатей встановлюють виходячи із забезпечення рівномірного і повного заповнення перерізу барабана падаючими потоками матеріалу (рис. 3.2, а). У разі зменшення подачі знижується ступінь заповнення барабана матеріалом і зачерпувальна здатність ковшів повністю не реалізується, що спричиняє утворення вільного вікна 1 (рис. 3.2, б). Зі збільшенням подачі ступінь заповнення барабана матеріалом може бути вищим за розрахунковий, і зачерпувальна здатність лопатей буде недостатньою, і, як наслідок, виникне зона «завалу» 2 (рис. 3.2, в), яка сильно перевантажує двигун приводу барабана. З цієї причини зарубіжні фірми часто змінюють кут нахилу барабана залежно від продуктивності за принципом: більша вологість – менша продуктивність – менший кут нахилу барабана, і навпаки.

60...75°. Most often as blades in zone III use channels with a wall height of 0.08...0.12 of the drum diameter.

The number of blades is set on the basis of ensuring uniform and complete filling of the drum cross-section with falling flows of material (Figure 3.2, a). When reducing the feed decreases the degree of filling the drum with material and scooping ability of buckets is not fully realized, which causes formation of free window 1 (Figure 3.2, b). As the feed rate increases, the degree of filling of the drum with material can be higher than the calculated one and the scooping ability of the blades will be insufficient, and as a consequence there will be a zone of “blockage” 2 (Figure 3.2, c), strongly overloading the drum drive motor. For this reason, foreign companies often change the drum inclination angle depending on the productivity according to the principle: more moisture – less productivity – less drum inclination angle, and vice versa.

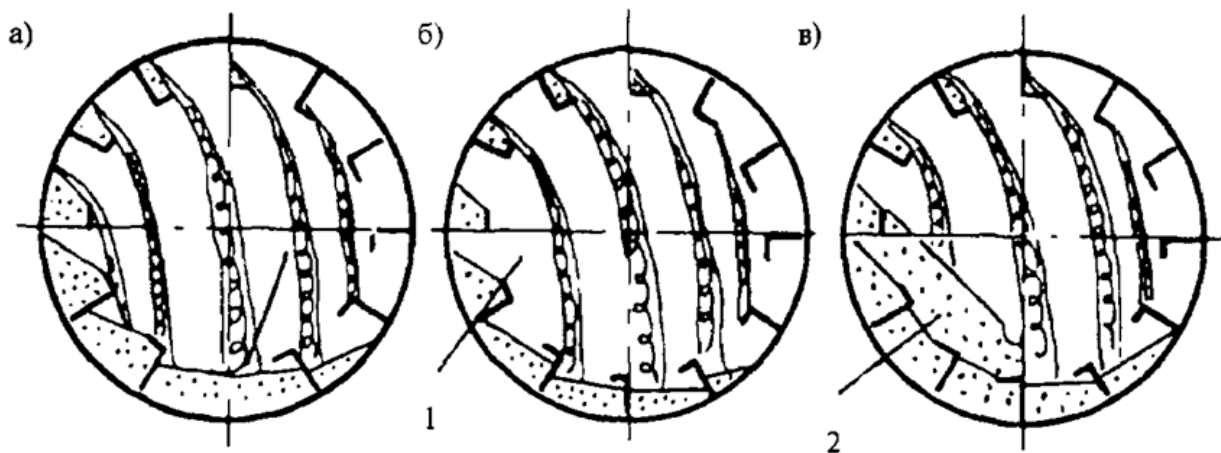


Рисунок 3.2 – Заповнення барабана падаючими потоками матеріалів при різному завантаженні: а – нормальне; б – менше норми; в – більше норми, 1 – вікно без матеріалу; 2 – зона «завалу»

Figure 3.2 – Filling of the drum with falling streams of materials at different loading: a – normal; b – less than normal; c – above normal, 1 – window without material; 2 – “blockage” zone

За способом сушіння матеріалу барабани можуть бути з протитечійним і поточним сушінням (рис. 3.3).

According to the method of drying the material, the drums can be counter-current and flow drying (Figure 3.3).

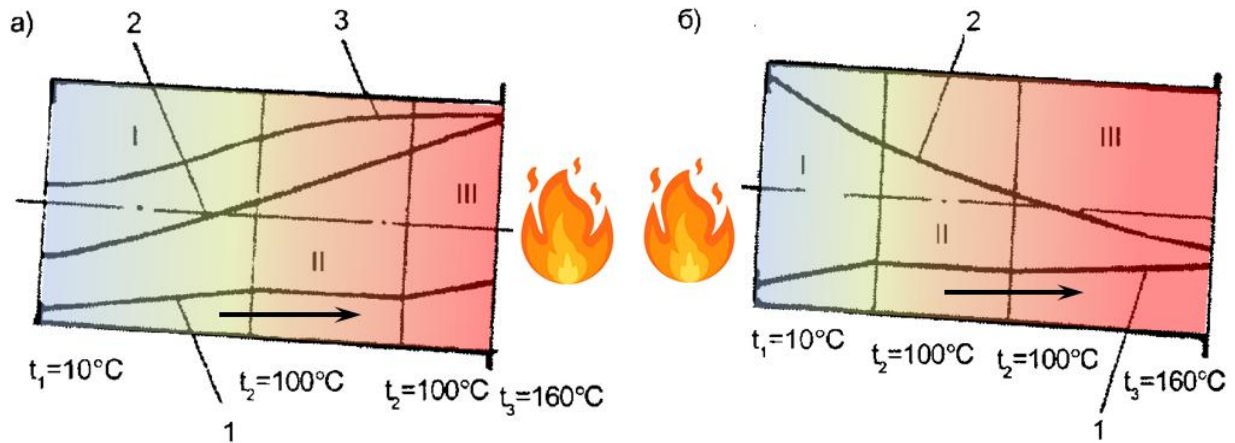


Рисунок 3.3 – Схема теплових процесів у сушильних барабанах: а – барабан із протитечійним способом сушіння матеріалів, б – барабан із поточковим способом сушіння матеріалів; 1 – температура матеріалу; 2 – температура газів; 3 – температура газів при довгофакельному горінні палива

Figure 3.3 – Diagram of thermal processes in drying drums: a – drum with countercurrent drying of materials, b – drum with flow drying of materials; 1 – material temperature; 2 – gas temperature; 3 – gas temperature during long-flame combustion

Під час протитечійного сушіння, що застосовується найчастіше, матеріали в похилому барабані рухаються від верхнього завантажувального торця до нижнього розвантажувального (рис. 3.3, а). Гарячі гази, отримані від спалювання палива, рухаються назустріч руху матеріалу.

Переваги протиточного сушіння – низька температура димових газів (120...150 °С) і високий тепловий ККД барабана.

Недоліки протиточного сушіння:

1. Дуже часті явища, коли температура димових газів  $T_d$  падає нижче 100 °С і пари води починають конденсуватися в газоходах, циклонах і димососі, що тягне за собою осідання пилу на вологу поверхню з утворенням бруду і подальшим «заростанням» газоходів, шнека, крильчатки димоходу. Це явище найчастіше проявляється ранньою весною і пізньою осінню, що загрожує змерзанням бруду в шнеках і димососах у нічний час і їхньою полумкою під час запуску.

2. У першій зоні підігрів вологого матеріалу здійснюється теплом гарячих газів і конденсацією парів води, що призводить до зменшення довжини першої зони, перезволоження і залипання матеріалу на лопатях.

3. Через великий перепад між середньою температурою газів у третій зоні ( $\approx 1200...1300$  °С) і середньою температурою матеріалів у цій зоні ( $\approx 130$  °С) навіть при

In counter-current drying, which is the most commonly used method, the materials in the inclined drum move from the upper feed end to the lower discharge end (Figure 3.3, a). Hot gases from the combustion of fuel move to meet the movement of the material.

The advantages of countercurrent drying are the low flue gas temperature (120...150 °С) and high thermal efficiency of the drum.

Disadvantages of countercurrent drying:

1. Very frequent phenomena when the flue gas temperature  $T_d$  falls below 100 °С and water vapour begins to condense in flues, cyclones and smoke exhausters, which entails dust settling on a wet surface with the formation of dirt and subsequent “overgrowth” of flues, auger, and chimney impeller. This phenomenon most often occurs in early spring and late autumn, which can lead to freezing of dirt in the augers and smoke exhausters at night and their breakdown during start-up.

2. In the first zone, the wet material is heated by the heat of hot gases and condensation of water vapour, which leads to a reduction in the length of the first zone, waterlogging and sticking of the material on the blades.

3. Due to the large difference between the average temperature of the gases in the third zone ( $\approx 1200...1300$  °С) and the average temperature of the materials in this zone ( $\approx 130$  °С) even at

незначних коливаннях продуктивності або вологості матеріалу (що трапляється частіше) мають місце стрибки температури нагріву матеріалу. При цьому недогрів менш небезпечний, ніж перегрів, за якого виникає брак.

4. З причини, зазначеної у 2-му пункті, зони I і II в сумі займають більшу частину довжини барабана, а зона III (недолік, зазначений у пункті 3) займає незначну довжину барабана, в якій реально можна здійснити хорошу завісу зсипання потоків матеріалу, що зсипаються, по перерізу барабана.

Якщо в барабані застосовується довгофакельне спалювання палива, то для усунення негативних явищ від конденсації палива на кам'яних матеріалах у зоні факела встановлюють лопаті, які проносять матеріал над факелом і забезпечують зсипання тільки по його периферії. Це забезпечує вільне горіння і хороше вигорання палива, але крива температур гарячих газів розташовується набагато вище за раціональну, зростає перепад температур між газами і матеріалом, зростає продуктивність барабана, але водночас збільшуються температура димових газів і питома витрата палива на нагрівання 1 т матеріалу.

Наочним показником ефективності роботи сушильного барабана є його питома продуктивність (у т/год на 1 м<sup>3</sup> об'єму барабана).

При потоковому сушінні (рис. 3.3, б) топковий агрегат розташований з боку завантаження матеріалу. У барабані протікають ті самі процеси, що й у разі протипоточного сушіння. Димові гази, що залишають сушильний барабан, мають температуру на 50...70 °С вищу, ніж температура нагрівання матеріалу.

Недоліки потокового способу сушіння: менший ККД; спалювання палива – тільки короткофакельне.

Переваги потокового способу сушіння: повністю виключається перегрівання матеріалу; у газоходах, циклонах і димососі виключено утворення конденсату (температура парів води та димових газів > 200 °С); зона III найпротяжніша (орієнтовно – половина довжини барабана), де легко здійснити рівномірну завісу з падаючих потоків заповнювача за перерізом барабана, знизити температуру парів води та димових

°С), even with slight fluctuations in productivity or material moisture (which is more common), there are jumps in the material heating temperature. At the same time, underheating is less dangerous than overheating, which causes rejects.

4. For the reason stated in point 2, zones I and II together occupy most of the length of the drum, and zone III (the disadvantage mentioned in point 3) occupies a small length of the drum in which it is realistically possible to achieve a good curtain of the flow of material being poured over the cross-section of the drum.

If long-flame combustion is used in the drum, then to eliminate the negative effects of fuel condensation on stone materials, blades are installed in the flame zone to carry the material over the flame and ensure that it is deposited only along its periphery. This ensures free combustion and good fuel burnout, but the hot gas temperature curve is much higher than the rational one, the temperature difference between the gases and the material increases, the drum capacity increases, but at the same time the flue gas temperature and specific fuel consumption for heating 1 tonne of material increase.

A good indicator of the efficiency of a drying drum is its specific productivity (in t/h per 1 m<sup>3</sup> of drum volume).

In inline drying (Figure 3.3, b), the furnace unit is located on the material loading side. The same processes take place in the drum as in countercurrent drying. The flue gases leaving the drying drum have a temperature of 50...70 °С higher than the material heating temperature.

Disadvantages of the flow drying method: lower efficiency; fuel combustion is only short-flare.

Advantages of the flow drying method: overheating of the material is completely excluded; condensation is excluded in gas ducts, cyclones and smoke exhausters (temperature of water vapour and flue gases > 200 °С); zone III is the longest (approximately half the length of the drum), where it is easy to create a uniform curtain of falling aggregate flows across the drum, reduce the temperature of water vapour and flue gases to 170...175 °С

газів до 170...175 °C і підвищити питому продуктивність; матеріал у зоні I не перезвожується, отже, не налипає на лопаті.

Температура нагріву заповнювача залежить від часу його перебування в сушильному барабані, що визначається такими факторами: довжиною і діаметром барабана, кутом нахилу барабана, числом і конструкцією лопатей, швидкістю обертання барабана і розміром частинок заповнювача. Зазвичай час проходження заповнювача через сушильний (сушильно-змішувальний) барабан становить від 2 до 3 хв.

Температура мінеральних матеріалів під час виходу із сушильного барабана має відповідати значенням, зазначеним у таблиці 2 [8].

### 3.5 Гарячі елеватори та сортувальні агрегати

**Гарячі елеватори.** Для підйому гарячих матеріалів у сортувальний агрегат змішувальної вежі використовуються ланцюгові ковшові елеватори. Елеватори малої продуктивності і невеликої висоти підйому часто встановлюють у похилому положенні. Елеватори великої продуктивності і висоти підйому понад 6 м встановлюють, як правило, у вертикальному положенні. Для нормальної їхньої експлуатації неприпустимі перевантаження і потрапляння в приймальну воронку елеватора великогабаритних предметів. Для уловлювання великих предметів ставлять решітки попереднього відбору в бункери агрегату живлення і колосникові решітки перед завантаженням матеріалу в сушильний барабан.

**Сортувальні агрегати.** Найбільший ККД грохочення (~0,9) мають вібраційні грохоти, але через труднощі гасіння вібрації вони не набули широкого поширення. Найчастіше застосовують ексцентрикові грохоти з постійною амплітудою коливань і хорошим врівноваженням, але дещо меншим ККД.

Для підвищення ККД грохочення і підвищення довговічності сит грохоти роблять багатоярусними з режимом роботи кожного ярусу «нижній-верхній продукт».

На якість суміші, що готується, сортувальні агрегати чинять негативний вплив саме через низький ККД просіювання, що порушує зерновий склад суміші.

and increase specific productivity; the material in zone I is not waterlogged, and therefore does not stick to the blades.

The heating temperature of the aggregate depends on the time it stays in the drying drum, which is determined by the following factors: drum length and diameter, drum angle, number and design of blades, drum rotation speed and aggregate particle size. Typically, the time it takes for aggregate to pass through the drying (drying and mixing) drum is 2 to 3 minutes.

The temperature of mineral materials at the exit of the drying drum should correspond to the values specified in Table 2 [8].

### 3.5 Hot elevators and sorting units

**Hot elevators.** Chain bucket elevators are used to lift hot materials into the mixing tower's sorting unit. Elevators with low capacity and low lifting heights are often installed in an inclined position. Elevators of high capacity and lifting heights of more than 6 m are usually installed in a vertical position. For their normal operation, overloads and large objects falling into the elevator's intake hopper are unacceptable. To catch large objects, pre-screening grates are placed in the hoppers of the power unit and the grate before the material is loaded into the drying drum.

**Sorting units.** Vibrating screens have the highest screening efficiency (~0,9), but due to the difficulty of damping vibration, they are not widely used. Eccentric screens with a constant oscillation amplitude and good balance are more commonly used, but with somewhat lower efficiency.

To improve screening efficiency and increase the durability of screens, screens are made into multi-tiered screens with a "bottom-up product" mode of operation for each tier.

Sorting units have a negative impact on the quality of the prepared mixture due to the low screening efficiency, which disrupts the grain composition of the mixture.

### 3.6 Дозувальні агрегати

На установках застосовуються дозатори; вагові для сипучих і порошкоподібних матеріалів, об'ємні для бітуму і рідких добавок (ПАР).

До дозаторів висувають одну загальну вимогу – забезпечення допустимої похибки дозування піску і фракцій щебеню  $\pm 3\%$ , мінерального порошку і бітуму  $\pm 1,5\%$ .

На установках, що випускалися раніше, мінеральний порошок дозувався в дозаторі піску і щебеню. Якщо мінеральний порошок дозується в загальному ваговому бункері, то похибка дозування мінерального порошку буде вищою за допустиму. На всіх сучасних установках мінеральний порошок дозується в окремому ваговому дозаторі, що забезпечує допустиму похибку дозування.

Для дозування бітуму в установках періодичної дії застосовують здебільшого два типи дозаторів: поплавцевий із дозуванням бітуму в резервуарі та поплавцем як датчиком відміряної дози і безперервно-об'ємний із дозуванням бітуму витратоміром об'ємної дії (шестеренний або лопатевий насос-дозатор). Дозатори бітуму забезпечують дозування з певною похибкою: у дозаторів поплавцевого типу похибка дозування  $+1,5\%$ , у дозаторів безперервно-об'ємної дії похибка від  $\pm 0,5$  до  $\pm 1,0\%$ .

### 3.7 Змішувачі для приготування асфальтобетонних сумішей

Змішувач в установці є одним з основних агрегатів, що мають значний вплив на якість приготування суміші. У вітчизняній і зарубіжній практиці приготування асфальтобетонних сумішей знайшли найбільше застосування змішувачі двовальні періодичної дії примусового змішування і безперервної дії вільного змішування.

#### *Змішувачі двовальні двовальні періодичної дії*

У змішувачах періодичної дії (рис. 3.4) під час обертання валів лопаті переміщують суміш у поперечному напрямку, забезпечуючи її циркуляцію. Лопаті на кронштейнах встановлюються під кутом до осі вала, що створює можливість переміщення суміші вздовж валів. Завантаження змішувача здійснюється з вагового бункера-дозатора, а

### 3.6 Dosing units

Plants use dosing units; weighing for bulk and powdered materials, volumetric for bitumen and liquid additives (surfactants).

One general requirement for batchers is to ensure that the permissible dosing error for sand and crushed stone fractions is  $\pm 3\%$ , mineral powder and bitumen  $\pm 1,5\%$ .

In previous plants, mineral powder was dosed in a sand and gravel batcher. If the mineral powder is dosed in a common weighing hopper, the dosing error of the mineral powder will be higher than the permissible one. In all modern plants, the mineral powder is dosed in a separate weighing batcher, which ensures the permissible dosing error.

For bitumen dosing in batch plants, two types of dosing devices are mainly used: float dosing with bitumen dosing in a tank and a float as a measured dose sensor and continuous-volume dosing with bitumen dosing by a volumetric flow meter (gear or vane dosing pump). Bitumen dispensers provide dosing with a certain error: for float-type dispensers, the dosing error is  $+1,5\%$ , for continuous-volume dispensers, the error is from  $\pm 0,5$  to  $\pm 1,0\%$ .

### 3.7 Mixers for the preparation of asphalt mixtures

The mixer in an asphalt plant is one of the main units that have a significant impact on the quality of the mixture. In the domestic and foreign practice of preparing asphalt mixtures, the most commonly used mixers are twin-shaft mixers of periodic forced mixing and continuous free mixing.

#### *Twin-shaft batch mixers*

In batch mixers (Figure 3.4), when the shafts rotate, the blades move the mixture in the transverse direction, providing its circulation. The blades on the brackets are installed at an angle to the shaft axis, which creates the possibility of moving the mixture along the shafts. The mixer is loaded from a weight hopper and unloaded through a hole in the bottom, which is closed with a gate.

розвантаження – через отвір у днищі, що закривається затвором.

До змішувача висуваються такі вимоги:

- рівномірно і за короткий проміжок часу розподілити компоненти суміші по масі замісу;

- забезпечити рівномірний розподіл бітуму по поверхнях мінерального матеріалу;

- забезпечити оперативність розвантаження змішувача.

На швидкість циркуляції суміші впливають: схема розміщення лопатей; параметри змішувача, які залежать від форми корпусу змішувача, оцінюваної відношенням довжини корпусу змішувача до його ширини.

The mixer has the following requirements:

- distribute the components of the mixture evenly and in a short period of time over the mass of the batch;

- ensure uniform distribution of bitumen over the surfaces of the mineral material;

- to ensure that the mixer is unloaded quickly.

The circulation rate of the mixture is influenced by: the arrangement of the blades; mixer parameters, which depend on the shape of the mixer body, estimated by the ratio of the length of the mixer body to its width.

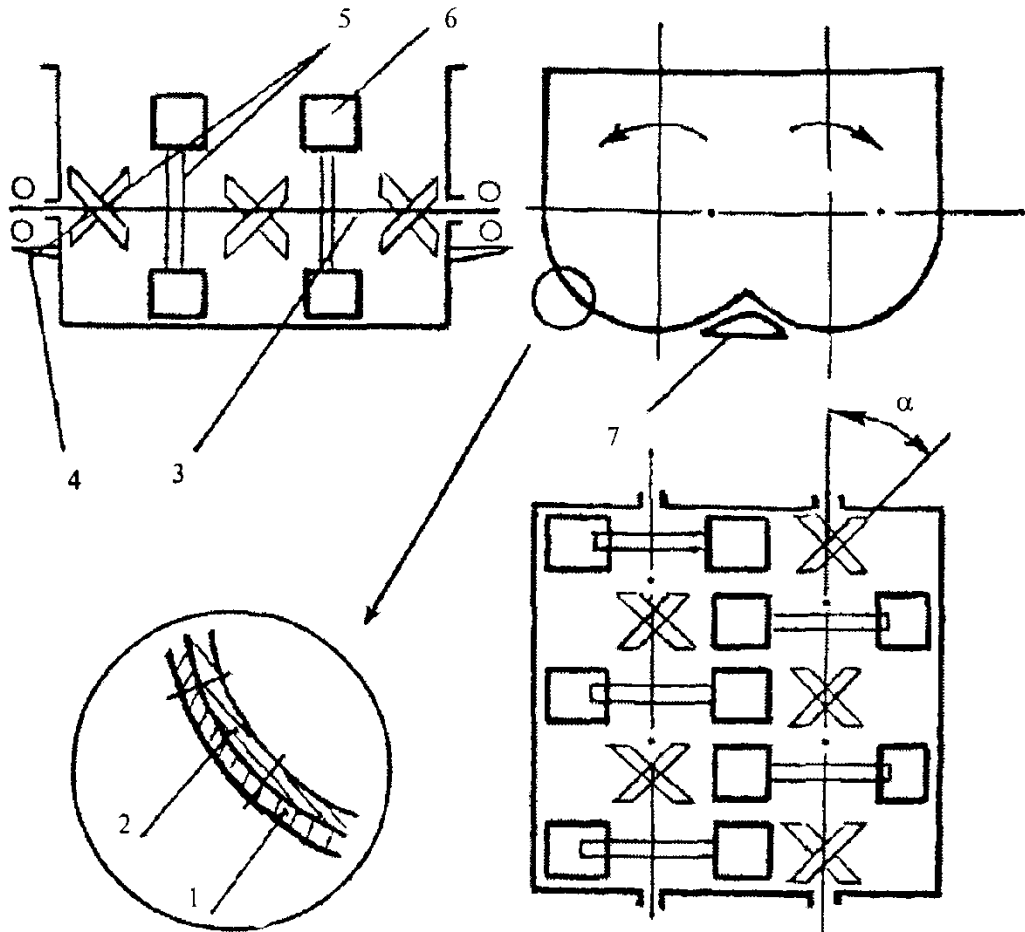


Рисунок 3.4 – Схема двовального лопатевого змішувача: 1 – корпус; 2 – футерування; 3 – вал; 4 – опора вала; 5 – кронштейн; 6 – лопать; 7 – затвор;  $\alpha$  – кут установлення лопатей

Figure 3.4 – Scheme of the twin-shaft paddle mixer: 1 – case; 2 – lining; 3 – shaft; 4 – shaft support; 5 – bracket; 6 – blade; 7 – gate;  $\alpha$  – angle of installation of blades

Залежно від способу розміщення лопатей на валах змішувача розрізняють протитечійну і поточно-контурунну схеми руху суміші в корпусі змішувача. Нині здебільшого

Depending on the way the blades are arranged on the mixer shafts, there are countercurrent and flow-circuit schemes of mixture movement in the mixer body. Today,

застосовують останню схему, коли в корпусі змішувача (рис. 3.5) лопаті на одному валу встановлені так, що зміщують суміш від лівого торця змішувача до правого, а наприкінці одна-дві пари лопатей установлено зі зворотним кутом для зміщення суміші в зустрічному напрямі. На другому валу лопаті встановлені у зворотному напрямку і зміщують суміш від правого торця змішувача до лівого.

У процесі приготування суміші слід домагатися повного обволікання поверхні зерен мінерального матеріалу плівкою бітуму постійної товщини. Час досягнення і повнота обволікання поверхні зерен мінерального матеріалу бітумом, міцність їхнього зчеплення зумовлені природою поверхні мінерального матеріалу, якістю бітуму і його дисперсною структурою, температурним режимом змішування компонентів суміші.

the latter scheme is mostly used, when in the mixer body (Figure 3.5) the blades on one shaft are installed in such a way that they shift the mixture from the left end of the mixer to the right, and at the end one or two pairs of blades are installed with an opposite angle to shift the mixture in the opposite direction. On the second shaft, the blades are mounted in the opposite direction and shift the mixture from the right end of the mixer to the left.

In the process of preparing the mixture, it is necessary to achieve complete envelopment of the surface of the mineral material grains with a film of bitumen of constant thickness. The time of achievement and the completeness of the bitumen coating of the mineral material grains, the strength of their adhesion are determined by the nature of the mineral material surface, the quality of the bitumen and its dispersed structure, and the temperature regime of mixing the mixture components.

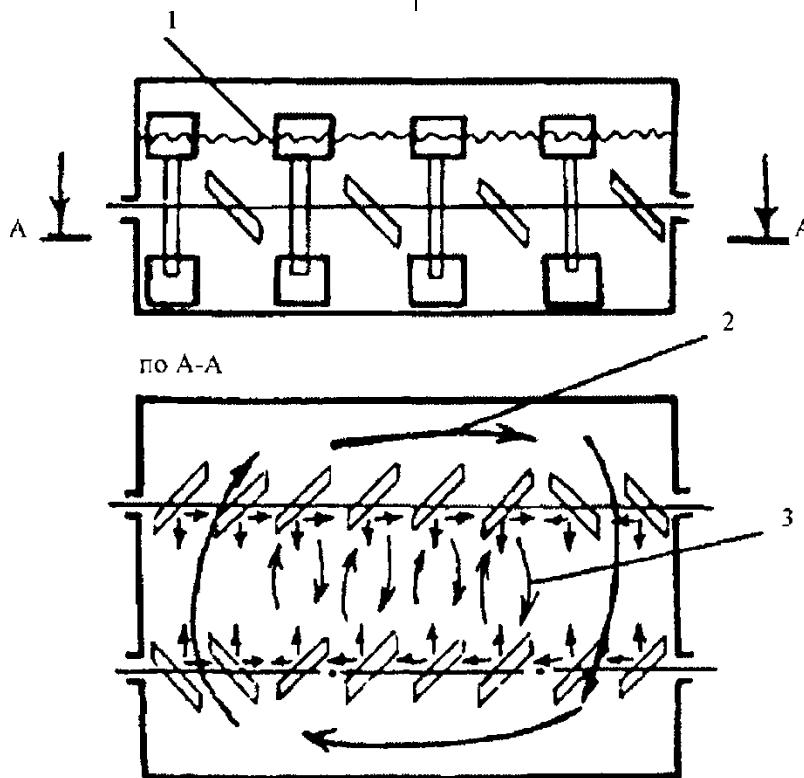


Рисунок 3.5 – Поточно-контурна схема руху суміші в змішувачах: 1 – рівень суміші; 2 – велике коло циркуляції; 3 – малі кола циркуляції

Figure 3.5 – Flow-circuit diagram of mixture movement in mixers: 1 – mixture level; 2 – large circulation circle; 3 – small circulation circles

Одним із дієвих шляхів забезпечення якості приготування суміші та зниження енергоємності цієї операції є ефективний контроль за стабільністю її температурного

One of the most effective ways to ensure the quality of the mixture and reduce the energy consumption of this operation is to effectively control the stability of its

режиму в нормованому діапазоні температур (табл. 3.2 [8]).

Тривалість перемішування компонентів асфальтобетонної суміші змінюється залежно від технологічної черговості їхньої подачі в змішувач. Особливо це характерно для високощербенистих сумішей (типи А і Б).

Тривалість змішування суміші визначається технічними характеристиками змішувальних установок. Її орієнтовні значення наведено в табл. 3.2.

temperature regime within the normalized temperature range (Table 3.2 [8]).

The duration of mixing the components of the asphalt mixture varies depending on the technological order of their supply to the mixer. This is especially true for high gravel mixtures (types A and B).

The duration of mixing is determined by the technical characteristics of the mixing plants. Its approximate values are given in table 3.2.

Таблиця 3.2 – Тривалість змішування суміші  
Table 3.2 – Duration of mixing

Тип суміші Type of mix	Тривалість змішування у змішувачах примусової дії, с Duration of mixing in forced-action paddle mixers, s	
	Сухе змішування Dry mixing	Мокре змішування Wet mixing
Піщана Sandy	15	45...60
Дрібнозерниста Fine-grained	15	30...45
Крупнозерниста Coarse-grained	–	20...30

**Примітки:** 1. Тривалість змішування піщаних, дрібнозернистих сумішей у змішувачах із схемою протиточного руху має бути збільшена в 1,5...2 рази.

2. Тривалість мокрого змішування слід збільшувати при зменшенні вмісту бітуму або збільшення вмісту мінерального порошку.

3. Застосовуючи ПАР, і навіть активований мінеральний порошок, тривалість мокрого змішування можна зменшити на 15...30 %.

### 3.8 Агрегати для боротьби з пилом

Найчастіше пил уловлюється апаратами пасивної дії – пилоосаджувальними камерами та апаратами активної дії – циклонами та мультициклонами, електрофільтрами, рукавними фільтрами та мокрими пиловловлювачами.

Розрізняють одно-, дво- та триступінчасті системи очищення газів. Одноступінчасті системи очищення газів практично не застосовуються через значні викиди дрібного пилу.

Двоступінчасті системи очищення газів найбільш поширені: як перший ступінь використовуються будь-які апарати сухого очищення, а як другий – апарати мокрого

**Notes:** 1. The duration of mixing sand and fine-grained mixtures in mixers with a counter-current flow scheme should be increased by 1.5...2 times.

2. The duration of wet mixing should be increased with a decrease in the bitumen content or an increase in the content of mineral powder.

3. Using surfactants, as well as activated mineral powder, the duration of wet mixing can be reduced by 15...30 %.

### 3.8 Dust control units

Most often, dust is captured by passive devices – dust settling chambers and active devices – cyclones and multicyclones, electrostatic precipitators, bag filters and wet dust collectors.

There are one-, two- and three-stage gas cleaning systems. Single-stage gas cleaning systems are practically never used due to significant emissions of fine dust.

Two-stage gas cleaning systems are the most common: any dry-cleaning devices are used as the first stage, and wet cleaning devices

очищення для уловлювання дрібного пилу, іноді фільтри.

Треступенева система очищення газів зустрічається дуже рідко.

#### *Перший ступінь очищення газів*

У пилоосаджувальних камерах газ очищається за рахунок гравітаційного осадження пилу. Найбільш ефективно їх використовувати для уловлювання частинок пилу більше 0,1 мм.

Вимоги до пилоосаджувальних камер: швидкість руху газу 0,2...0,8 м/с; рух газу в камері – строго ламінарне з досить великими вхідними та вихідними ділянками.

Недотримання цих вимог призводить до вловлювання тільки найбільшого пилу. Прикладом такої пилоосаджувальної камери є система газоочищення установки «Тельтомат».

Режимні параметри циклонів підтримують у певних діапазонах, незалежно від їхнього діаметра. Середня осьова швидкість газу корпусі циклонів становить 2,5...4,5 м/с. За цим показником і діаметром циклону визначають його пропускну здатність м<sup>3</sup>/год. Швидкість газу у вхідному тангенціальному патрубку приймається рівною 12...22 м/с, у вихлопному патрубку 7...12 м/с.

При швидкості газу у вхідному патрубку 12...22 м/с відцентрове прискорення, що виникає в корпусі при обертанні газового потоку, перевищує прискорення сили тяжіння землі в 50...300 разів і більше. При цьому чим менше діаметр корпусу, тим вище відцентрове прискорення та вища ефективність відділення пилу. Циклони однаково добре працюють і при надмірному тиску (нагнітання запиленого газу у вхідний патрубок) і при розрядженні (витяжка газу з вихлопних патрубків). Опір руху газу в циклонах дуже велике і досягає 2300...2700 Па.

#### *Загальні рекомендації*

Компонування агрегатів. Циклони доцільно ставити перед димососом (робота при розрядженні). У цьому випадку весь пил, особливо великий, уловлюється циклоном і лопаті крильчатки димососа зношуються в 2...2,5 рази повільніше.

Підвищення ефективності газоочищення. Рух газу на вході в циклон має бути ламінарним. На газоходах повинно бути різких поворотів, розширень, звужень. Для переведення турбулентного потоку в

for capturing fine dust, sometimes filters, are used as the second.

A three-stage gas cleaning system is extremely rare.

#### *First stage of gas cleaning*

In dust settling chambers, the gas is cleaned due to gravitational settling of dust. They are most effectively used to capture dust particles larger than 0,1 mm.

Requirements for dust settling chambers: gas velocity of 0,2...0,8 m/s; gas movement in the chamber is strictly laminar with sufficiently large inlet and outlet sections.

Failure to comply with these requirements results in the capture of only the largest dust. An example of such a dust settling chamber is the gas cleaning system of the Teltomat installation.

The operating parameters of the cyclones are maintained within certain ranges, regardless of their diameter. The average axial velocity of the gas in the cyclone body is 2,5...4,5 m/s. This indicator and the cyclone diameter are used to determine its throughput capacity in m<sup>3</sup>/h. The gas velocity in the inlet tangential branch pipe is taken to be 12...22 m/s, in the exhaust branch pipe 7...12 m/s.

At a gas velocity in the inlet pipe of 12...22 m/s, the centrifugal acceleration occurring in the housing during rotation of the gas flow exceeds the acceleration of gravity by 50...300 times or more. Moreover, the smaller the diameter of the housing, the higher the centrifugal acceleration and the higher the efficiency of dust separation. Cyclones work equally well both at excess pressure (injection of dusty gas into the inlet pipe) and at vacuum (extraction of gas from the exhaust pipes). The resistance to gas movement in cyclones is very high and reaches 2300...2700 Pa.

#### *General recommendations*

Layout of units. It is advisable to install cyclones before the smoke exhauster (operation at vacuum). In this case, all dust, especially large dust, is captured by the cyclone and the impeller blades of the smoke exhauster wear out 2...2,5 times slower.

Increasing the efficiency of gas cleaning. The gas flow at the cyclone inlet must be laminar. There must be no sharp turns, expansions or contractions in the flues. To convert the turbulent flow into laminar flow,

ламінарий перед циклонами в газоході ставлять розсікачі потоку (набір патрубків із тонкої жерсті по всьому перерізу газоходу). Перевагу слід віддавати циклонам із похилим вхідним патрубком і з верхньою похилою кришкою. Для попередження винесення пилу з пилозбірної камери на нижній отвір конуса (знизу) ставлять пластинчастий розсікач (паралельно осі циклону) або (а частіше разом з розсікачем) конічний відбивач з кільцевим зазором у нижній частині конуса. В цьому випадку пил йде через кільцеве простір в пилозбірник, а повітряний вихор по конічному відбивачеві повертається вгору. Крім циклонів із циліндричним корпусом випускаються конічні циклони, які дають більш високі ступені очищення газів.

У батарейних циклонах найменший ступінь очищення відзначений при застосуванні закручує апарат типу «гвинт». Закручуючий апарат типу «розетка» з плоскими лопатками має дещо вищу ефективність очищення, ніж «гвинт». Найкращі результати з уловлювання пилу та зниження опору руху газу виявлено у закручує апарат типу «розетка» з криволінійними профільними лопатками.

Зниження опору руху газу в циклоні. Великий опір руху газу пов'язаний із трьома причинами: турбулентним режимом перебігу газу; протиточним режимом роботи циклону, коли вхідний газ, закручуючи, рухається вниз, потім змінює напрямок і рухається вгору; високою швидкістю руху газу у вихлопній трубі (7...12 м/с).

Існує кілька способів зниження цих опорів. По-перше, необхідно перевести турбулентний перебіг газу в ламінарий режим. По-друге, домогтися зниження тертя між низхідним зовнішнім потоком і сильнозакрученим висхідним потоком газу (застосування стабілізаторів та відбивачів). Для зниження тертя у вихлопному патрубку застосовуються різного типу розкручувачі, які встановлюються всередині корпусу на вході у вихлопну трубу або в переході з вихлопної труби до газоходу шляхом встановлення розкручування равлика (подібного до вхідного). Дуже суттєве зниження опору руху газу створює лопатевий аксіальний закручувач типу «розетка» з криволінійними лопатками.

flow splitters (a set of thin sheet metal pipes along the entire cross-section of the flue) are installed in front of the cyclones in the flue. Preference should be given to cyclones with an inclined inlet pipe and an inclined top cover. To prevent dust from being carried out of the dust collection chamber, a plate splitter (parallel to the cyclone axis) or (more often together with the splitter) a conical reflector with an annular gap in the lower part of the cone is installed on the lower opening of the cone (from below). In this case, the dust goes through the annular space into the dust collector, and the air vortex returns upward along the conical reflector. In addition to cyclones with a cylindrical body, conical cyclones are produced, which provide higher degrees of gas purification.

In battery cyclones, the lowest degree of purification is noted when using a swirling device of the “screw” type. A swirling device of the “rosette” type with flat blades has a slightly higher cleaning efficiency than a “screw”. The best results in dust collection and reduction of resistance to gas movement were found in a swirling device of the “rosette” type with curved profile blades.

Reduction of resistance to gas movement in a cyclone. High resistance to gas movement is associated with three reasons: turbulent gas flow; counter-current cyclone operation, when the incoming gas, swirling, moves downwards, then changes direction and moves upwards; high gas velocity in the exhaust pipe (7...12 m/s).

There are several ways to reduce these resistances. Firstly, it is necessary to transfer the turbulent gas flow to a laminar regime. Secondly, to achieve a reduction in friction between the descending external flow and the highly swirling ascending gas flow (using stabilizers and reflectors). To reduce friction in the exhaust pipe, various types of untwisters are used, installed inside the housing at the inlet to the exhaust pipe or in the transition from the exhaust pipe to the gas duct by installing an untwisting snail (similar to the inlet). A very significant reduction in resistance to gas movement is created by a vane axial twirler of the “rosette” type with curved blades.

Для нормальної експлуатації циклонів необхідно: забезпечити герметичність і виключити підсмоктування повітря в шнек видалення пилу, в пилозбірну камеру, циклони; підтримувати температуру газів у циклонах на 30...50 °С вище за точку роси, для виключення конденсації парів води вхідний газохід і циклони теплоізольовують; для зниження виносу пилу з сушильного барабана продуктивність димососа пов'язують з надходженням гарячих газів з топки шляхом підтримки розрядження в барабані на рівні 20...50 Па. Допустима запиленість газу для циклонів діаметром: 400...600 мм – не більше 200 г/м<sup>3</sup>; 600...800 мм – не більше 400 г/м<sup>3</sup>; 1000...2000 мм – не більше 3000 г/м<sup>3</sup>; 2000...3000 мм – не більше 6000 г/м<sup>3</sup>.

Фільтри з бавовняних тканин рекомендується експлуатувати при температурі не вище 60 °С за відсутності пар кислот, а вовняні фільтри – при температурі не вище 90 °С за відсутності парів лугів. Фільтри із лавсанових ниток мають термостійкість до 140 °С. Останнім часом розроблені фільтри із синтетичних волокон із тривалою термостійкістю до 200-220 °С у кислому та лужному середовищі. Склотканина з ниток алюмоборосилікатного скла може тривалий час експлуатуватися при 250...260 °С, а в окремих випадках – до 400 °С.

Неприпустима конденсація парів води у фільтрах.

#### *Другий ступінь очищення газів*

Принцип дії мокрих пиловловлювачів заснований на захопленні частинок пилу водою або їх змочуванні та коагуляції. Мокрі пиловловлювачі класифікуються за напрямом руху потоків, методом контакту пилу та газу з рідиною, швидкості газового потоку, способу розпилювання рідини.

Найбільш проста та загальна класифікація заснована на характері зустрічі частинок пилу з водою та їх змочування. За цією ознакою всі мокрі пиловловлювачі можна розділити на три типи: найпростіші (статичні) промивачі (ударні, ударно-інерційні, відцентрові); швидкісні промивачі (турбулентні); пневматичні пиловловлювачі (барботаажні, пінні та барботаажно-пінні).

Уловлювачі першого типу прості за конструкцією, найчастіше мають низький опір руху газу, але великі габарити. Ступінь

For normal operation of cyclones it is necessary to: ensure tightness and exclude air suction into the dust removal auger, into the dust collection chamber, into the cyclones; maintain the temperature of gases in the cyclones 30...50 °C above the dew point, to exclude condensation of water vapor, the inlet flue and cyclones are thermally insulated; to reduce dust removal from the drying drum, the performance of the smoke exhauster is linked to the flow of hot gases from the furnace by maintaining a vacuum in the drum at a level of 20...50 Pa. Permissible dustiness of gas for cyclones with a diameter of: 400...600 mm – no more than 200 g/m<sup>3</sup>; 600...800 mm – no more than 400 g/m<sup>3</sup>; 1000...2000 mm – no more than 3000 g/m<sup>3</sup>; 2000...3000 mm – no more than 6000 g/m<sup>3</sup>.

Cotton filters are recommended to be used at temperatures no higher than 60 °C in the absence of acid vapors, and wool filters – at temperatures no higher than 90 °C in the absence of alkali vapors. Filters made of lamsan threads have heat resistance up to 140 °C. Recently, filters made of synthetic fibers with long-term heat resistance up to 200-220 °C in acidic and alkaline environments have been developed. Glass fabric made of aluminoborosilicate glass threads can be used for a long time at 250...260 °C, and in some cases – up to 400 °C.

Condensation of water vapor in filters is unacceptable.

#### *Second stage of gas purification*

The operating principle of wet dust collectors is based on the capture of dust particles by water or their wetting and coagulation. Wet dust collectors are classified by the direction of flow movement, the method of contact of dust and gas with liquid, the speed of gas flow, the method of liquid atomization.

The simplest and most general classification is based on the nature of the dust particles meeting water and their wetting. According to this feature, all wet dust collectors can be divided into three types: the simplest (static) washers (impact, impact-inertial, centrifugal); high-speed washers (turbulent); pneumatic dust collectors (bubbling, foam and bubble-foam).

The collectors of the first type are simple in design, most often have low resistance to gas movement, but large

уловлювання коливається від 70 до 90 % пилу з розміром  $> 5$  мкм.

Уловлювачі другого типу прості за конструкцією, при малому поперечному перерізі мають більшу довжину і частіше встановлюються горизонтально. Опір руху газів досить великий (5...7 кПа), значна енергоємність, але ступінь очищення газів дуже високий.

Уловлювачі третього типу прості за конструкцією, мають дуже високу питому продуктивність і малі габарити, особливо барботажно-пінні. Опір руху газів пінних і барботажно-пінних апаратів дещо вищий, ніж в апаратах першого типу. Ступінь уловлювання частинок більше 20 мкм – 100 %, розміром 5...20 мкм ~ 95...98 %, частинок дрібніше 5 мкм ~ 60...80 %.

dimensions. The degree of collection varies from 70 to 90 % of dust with a size of  $> 5$   $\mu\text{m}$ .

The collectors of the second type are simple in design, have a large length with a small cross-section and are often installed horizontally. The resistance to gas movement is quite high (5...7 kPa), significant energy consumption, but the degree of gas purification is very high.

The collectors of the third type are simple in design, have a very high specific productivity and small dimensions, especially bubble-foam ones. The resistance to gas movement of foam and bubble-foam devices is somewhat higher than in the first type of devices. The degree of trapping particles larger than 20  $\mu\text{m}$  is 100 %, 5...20  $\mu\text{m}$  in size ~ 95...98 %, particles smaller than 5  $\mu\text{m}$  ~ 60...80 %.

## РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ

Як відомо, найбільше енергії на заводах витрачається на сушіння заповнювачів, нагрівання асфальтобетону та асфальтобетонної суміші, що зберігається, а також на роботу двигунів [9].

Заходи, наведені нижче, стосуються енергоефективності процесів і технологій, що використовуються на заводах із виробництва асфальтобетонних сумішей і можуть призвести до значної економії коштів при одночасних підтримці або збільшенні продуктивності заводу, а в деяких випадках і до покращення якості продукції.

### 4.1 Зберігання, обробка, сушіння та нагрівання заповнювачів

Значна економія енергії досягається при низькому вмісті води в грубих і дрібних заповнювачах, що зменшує кількість необхідного сушіння. При зміні вмісту вологи на 1 % потреба в енергії збільшується на 10 % [9].

**Майданчики з твердим покриттям і нахилом для розміщення запасів заповнювачів.** Заповнювачі часто складають на землі без заходів для відводу води, що призводить до високого вмісту води, особливо біля основи штабеля. Коли територія під складами на заводі з виробництва асфальтобетонної суміші заасфальтована і нахилена, вміст вологи в заповнювачах зменшується на 2 % і більше [10], що призводить до зменшення витрат на осушення майже на 30 % [11].

Одним із ключових моментів у цьому підході є забезпечення достатнього часу для висихання заповнювача природнім шляхом, що досягається правильною організацією навантажувально-розвантажувальних робіт. При складуванні заповнювача на майданчик з нахилом, додавати нові матеріали слід внизу схилу, а матеріали, які мали більше часу для висихання, переміщувати вгору по схилу. Крім того, можна застосувати розділення заповнювача на два відвали і передбачити почергове використання відвалів із більш сухим матеріалом, щоб дати час новому матеріалу висохнути (рис. 4.1).

## CHAPTER 4. METHODS OF REDUCING ENERGY CONSUMPTION IN THE MANUFACTURE OF ASPHALT MIXTURES

As it is known, most energy in plants is consumed by drying aggregates, heating asphalt concrete and stored asphalt mixtures, and running engines [9].

The measures below address the energy efficiency of processes and technologies used in asphalt mixing plants and can lead to significant cost savings while maintaining or increasing plant productivity and, in some cases, improving product quality.

### 4.1 Storage, processing, drying and heating of aggregates

Significant energy savings are realized when the water content of coarse and fine aggregates is kept low, reducing the amount of drying needed. For every 1 % change in moisture content, energy requirements change by 10 % [9].

**Paved and sloped areas for storing aggregate stockpiles.** Aggregates are often stored on the ground without measures to drain water, resulting in high water content, especially at the base of the stack. When the area under the stockpiles at an asphalt mix plant was paved and sloped, the moisture content of the aggregates decreased by almost 2 % [10], resulting in a reduction in dewatering costs of almost 30 % [11].

One of the key points in this approach is to ensure that the aggregate has sufficient time to dry naturally, which is achieved by properly organizing the loading and unloading operations. When stacking aggregate on a sloping site, new materials should be added at the bottom of the slope, and materials that have had more time to dry should be moved up the slope. Alternatively, you can split the fill into two heaps and provide for alternate use of the heaps with drier material to allow time for the new material to dry (Figure 4.1).

Таблиця 4.1 – Потенціал енергозбереження від зменшення вологості заповнювачів  
 Table 4.1 – Energy saving potential from reducing aggregate moisture content

% вологи до зміни % of moisture before change	% вологи після зміни % of moisture after change																		
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
1,0	0%																		
1,5	8%	0%																	
2,0	15%	7%	0%																
2,5	21%	14%	7%	0%															
3,0	26%	19%	13%	6%	0%														
3,5	30%	24%	18%	12%	6%	0%													
4,0	34%	29%	23%	17%	11%	6%	0%												
4,5	38%	33%	27%	22%	16%	11%	5%	0%											
5,0	41%	36%	31%	28%	21%	15%	10%	5%	0%										
5,5	44%	39%	34%	29%	24%	20%	15%	10%	5%	0%									
6,0	47%	42%	37%	33%	28%	23%	19%	14%	9%	5%	0%								
6,5	49%	45%	40%	36%	31%	27%	22%	18%	13%	9%	4%	0%							
7,0	51%	47%	43%	38%	34%	30%	26%	21%	17%	13%	9%	4%	0%						
7,5	53%	49%	45%	41%	37%	33%	29%	25%	20%	16%	12%	6%	4%	0%					
8,0	55%	51%	47%	43%	39%	35%	31%	28%	24%	20%	16%	12%	8%	4%	0%				
8,5	57%	53%	49%	45%	42%	38%	34%	30%	27%	23%	19%	15%	11%	8%	4%	0%			
9,0	58%	55%	51%	47%	44%	40%	36%	33%	29%	26%	22%	18%	15%	11%	7%	4%	0%		
9,5	60%	56%	53%	49%	46%	42%	39%	35%	32%	28%	25%	21%	18%	14%	11%	7%	4%	0%	
10,0	61%	58%	54%	51%	48%	44%	41%	37%	34%	31%	27%	24%	20%	17%	14%	10%	7%	3%	0%

Другим ключовим моментом є організація роботи навантажувачів таким чином, щоб завантажувати в живильні агрегати матеріал із найменшим вмістом вологи. Для цього оператори навантажувачів мають брати матеріали на висоті близько 60 см над рівнем землі (рис. 4.2). Такий висновок дало можливість зробити оцінювання вмісту вологи у штабелі крупнозернистого піску висотою 3 метри через 24 години після дощу 50 мм (Sines, 2022). Як показано на рисунку 4.2, суттєва зміна вмісту вологи – з 6 до 18 % – спостерігалася на висоті приблизно 60 см над рівнем землі.

The second key point is to organize the operation of the loaders in such a way as to load the material with the lowest moisture content into the feeding units. To do this, loader operators should take materials at a height of about 60 cm above ground level (Figure 4.2). This conclusion was used to estimate the moisture content of a 3-meter-high stack of coarse sand 24 hours after a 50 mm rainfall (Sines, 2022). As shown in Figure 4.2, a significant change in moisture content – from 6 to 18 % – was observed at a height of approximately 60 cm above ground level.



Рисунок 4.1 – Сховище з твердим покриттям під штабелем

Figure 4.1 – Paved storage under a stockpile

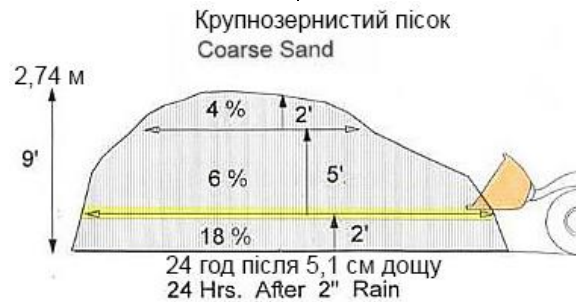


Рисунок 4.2 – Вміст вологи в штабелі

Figure 4.2 – Moisture content in a stockpile

Окрім економії витрат на осушення, з'являються додаткові вигоди, оскільки зменшуються втрати сировини внаслідок її змішування з ґрунтом (3% економії матеріалів), а також економиться паливо мобільного обладнання (навантажувачів), коли вони рухаються і маневрують по твердому покриттю.

Період окупності для сховища з твердим покриттям і нахилом становить менше семи місяців [10].

**Зберігання заповнювачів під укриттям.** Потреба в енергії для сушіння заповнювачів з типовим вмістом води 5 % становить близько 10,5 кілограм пари за годину на тонну заповнювача. Коли вміст води подвоюється, потреба в парі зростає до 18 кг пари за годину на тонну заповнювача, тобто майже на 70 % [11]. Таким чином, зберігання заповнювачів під укриттям може призвести до значної економії енергії [10, 12]. За оцінками Національної асоціації асфальтобетонних покриттів (США), вартість будівництва споруди для укриття запасів окупиться протягом трьох років. Крім того, слід передбачати орієнтацію складських приміщень таким чином, щоб скористатися сонячним світлом або напрямком переважаючих вітрів для максимального вільного висихання.

**Максимізація ефективності пальників.** Вибір найефективнішого

In addition to the savings in drainage costs, there are additional benefits as there is less loss of raw materials due to mixing with the soil (3% material savings), and fuel savings for mobile equipment (forklifts) as they move and maneuver over the hard surface.

The corresponding payback period for a paved and sloped storage area was estimated to be less than seven months [10].

**Storage of aggregates under cover.** The energy requirement for drying aggregates with a typical water content of 5 % is about 10,5 kilograms of steam per hour per ton of aggregate. When the water content is doubled, the steam requirement increases to 18 kg of steam per hour per ton of aggregate, i.e., almost 70 % [11]. Thus, storing aggregates under cover can lead to significant energy savings [10, 12]. National Asphalt Pavement Association (USA) estimates that the cost of constructing a stockpile shelter will be recouped within three years. In addition, consideration should be given to orienting the storage area to take advantage of sunlight or prevailing winds to maximize free drying.

**Maximize burner efficiency.** Selecting the most efficient burner option when designing

варіанта пальника при проектуванні нової системи або модернізації існуючої системи є ключовим для обмеження втрат енергії. Пальник повинен бути підібраний відповідно до розмірів інших компонентів установки, включаючи барабан, бункер тощо. Пальникова система потребує регулярного технічного обслуговування для забезпечення оптимальної продуктивності. Налаштування пальника слід перевіряти щомісяця або щокварталу, а форсунки потрібно часто чистити, щоб забезпечити ефективне розпилення палива; пальники, що використовують менш чисте паливо, ніж природний газ, слід чистити і налаштовувати частіше.

**Ізоляція корпусу сушильного барабана.** Втрати тепла з корпусу або оболонки сушильного барабана зазвичай становлять 5-10 %. Ізоляція оболонки зменшує споживання енергії та її втрати. Деякі конструкції протитечійних змішувачів безперервної дії включають змішувальний барабан, побудований навколо сушильного барабана, щоб скористатися тепловими втратами сушильного барабана, як, наприклад, Double Barrel компанії Astec і серія E3 RAP-Star компанії CMI Roadbuilding.

#### 4.2 Бітумне господарство

Більшість заводів із виготовлення асфальтобетонних сумішей використовують нагрівачі з гарячим маслом для нагрівання бітуму в резервуарах для зберігання, транспортних лініях, насосах і клапанах, а також для підтримки температури бітуму в резервуарах для зберігання. Нижче наведено конкретні заходи щодо підвищення ефективності цих компонентів.

**Масляні обігрівачі.** Масляний обігрівач використовує електрику або спалювання палива для передачі тепла маслу, яке, у свою чергу, циркулює через обладнання установки, що потребує додаткового нагріву. Варіанти підвищення ефективності масляних обігрівачів включають:

– встановлення більш ефективного масляного обігрівача. Конструкції нагрівачів зазвичай досягають 85 % ККД і максимізують вплив джерела тепла на котушки теплопередачі гарячого

a new system or retrofitting an existing system is key to limiting energy loss. The burner should be sized to match the size of the other components of the plant, including the drum, hopper, etc. The burner system needs regular maintenance to ensure optimum performance. Burner settings should be checked monthly or quarterly, and nozzles should be cleaned frequently to ensure efficient fuel atomization; burners using less clean fuels than natural gas should be cleaned and tuned more frequently.

#### **Insulation of the drying drum body.**

Heat loss from the drying drum body or shell is typically 5-10 %. Insulation of the shell reduces energy consumption and energy loss. Some designs of continuous countercurrent mixers include a mixing drum built around the drying drum to take advantage of the heat loss of the drying drum, such as Astec's Double Barrel and CMI Roadbuilding's E3 RAP-Star series.

#### 4.2 Bitumen infrastructure

Most asphalt mixing plants use hot oil heaters to heat the bitumen in storage tanks, transport lines, pumps and valves, and to maintain the temperature of the bitumen in storage tanks. Specific measures to improve the efficiency of these components are outlined below.

**Oil heaters.** An oil heater uses electricity or the burning of fuel to transfer heat to oil, which in turn circulates through the equipment in the plant that needs additional heating. Options for improving the efficiency of oil heaters include:

– installing a more efficient oil heater. Heater designs typically achieve 85 % efficiency and maximize the exposure of the heat source to the hot oil heat transfer coils. Most heaters have a service life of 20-30 years, so in

масла. Більшість обігрівачів мають термін служби 20-30 років, тому за відсутності ранньої заміни більшість обігрівачів, які зараз експлуатуються, можуть не відповідати ефективності сучасних обігрівачів, які зараз пропонуються на ринку;

– високі температури газу на виході з труб існуючих паливних систем нагріву вказують на неефективний нагрівач. Якщо заміна або реконструкція нагрівача неможлива, слід передбачити додавання теплообмінника до вихлопної труби, щоб уловлювати відпрацьоване тепло та використовувати його для попереднього нагріву масла для теплоносія. Виробники таких теплообмінників повідомляють про підвищення ефективності від 3 до 9 %;

– при заміні масляного обігрівача можна розглянути високоефективний електричний нагрівач. Сучасні електричні нагрівачі можуть запропонувати зниження експлуатаційних витрат і витрат на технічне обслуговування, подовжений термін служби обігрівача та скорочення викидів [13]. Зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії в структурі електроенергії зростатиме використання електричних обігрівачів допомагає промисловості зменшити свій вуглецевий слід.

**Ізоляція трубопроводів.** Після нагрівання гаряче масло циркулює по заводу до відповідного обладнання через спеціальні трубопроводи. Подібним чином бітуми також переміщується з резервуару для зберігання до змішувача по трубопроводу. Неналежним чином ізольовані трубопроводи передають тепло навколишньому повітрю, а не до «кінцевого споживача». Усі труби, коліна, клапани, насоси тощо повинні бути належним чином ізольовані, щоб уникнути таких витрат енергії. Ізоляція недорога, а терміни окупності дуже короткі, особливо при високих витратах на енергію.

**Ізоляція резервуарів і силосів.** Більшість сучасних резервуарів для зберігання бітуму мають стандартну 6-ти дюймову вбудовану ізоляцію. Старіші резервуари часто мають меншу ізоляцію, і деякі виробники взагалі не ізолювали дно своїх резервуарів, залишаючи простір для вдосконалення на багатьох заводах. Відповідно до моделювання Національної асоціації асфальтобетонних покриттів

the absence of early replacement, most heaters currently in operation may not match the efficiency of modern heaters currently on the market;

– high gas temperatures at the outlet of existing fuel heating systems indicate an inefficient heater. If replacement or refurbishment of the heater is not possible, consideration should be given to adding a heat exchanger to the exhaust pipe to capture the waste heat and use it to preheat the oil for the heat transfer fluid. Manufacturers of such heat exchangers report efficiency gains of 3 to 9 %;

– when replacing an oil heater, a high-efficiency electric heater can be considered. Modern electric heaters can offer reduced operating and maintenance costs, extended heater life and reduced emissions [13]. As the share of renewable energy sources in the electricity mix increases, the use of electric heaters will grow, helping industry to reduce its carbon footprint.

**Insulation of pipelines.** Once heated, the hot oil is circulated through the plant to the relevant equipment via special pipelines. Similarly, bitumen is also transported from the storage tank to the mixer via pipework. Inadequately insulated pipelines transfer heat to the surrounding air rather than to the “end user”. All pipes, elbows, valves, pumps, etc. must be properly insulated to avoid this energy waste. Insulation is inexpensive and payback periods are very short, especially when energy costs are high.

**Insulation of tanks and silos.** Most modern bitumen storage tanks have a standard 6-inch of built-in insulation. Older tanks often have less insulation, and some manufacturers did not insulate the bottom of their tanks at all, leaving room for improvement in many plants. According to National Asphalt Pavement Association (USA) modelling, a 113 m<sup>3</sup> horizontal bitumen tank with 6 inches of insulation would require 7,52 kW·h to keep

(США), горизонтальний бітумний резервуар об'ємом 113 м<sup>3</sup> із 6 дюймами ізоляції потребуватиме 7,52 кВт на годину для підтримки тепла. Той самий резервуар із 3 дюймами ізоляції споживав би на 83 % більше енергії, а резервуар без ізоляції споживав би на 5600 % більше енергії. Силоси для зберігання асфальтобетонної суміші також повинні бути добре ізольовані. Для всіх застосувань будь-яку зовнішню ізоляцію слід регулярно перевіряти на наявність пошкоджень або проникнення води та замінювати за потреби. Для цього, як правило використовують технологію тепловізійної камери, щоб допомогти виявити пошкодження або зруйновану ізоляцію.

### 4.3 Оптимізація виробництва

#### Коригування робочих графіків.

Зупинки та повторні запуски можуть споживати значно більше енергії. Зменшення їх шляхом оптимізації графіка виробництва може заощадити енергію. В одному конкретному дослідженні в Нідерландах асфальтний завод зменшив кількість перезапусків на 50 % завдяки кращому розкладу та плануванню, що призвело до економії енергії на 1,5 % [14].

#### Альтернативні види палива.

Більшість пальників сушильного барабана мають здатність спалювати рідке та газоподібне паливо та перемикатися між ними за потреби. Коли ціни на природний газ конкурентоспроможні, більшість заводів, які мають доступ до природного газу, використовуватимуть його. Заводи, які не розташовані поблизу магістралей природного газу, можуть натомість перейти на мазут, регенероване масло (RFO), пропан, скраплений природний газ (LNG) або стиснений природний газ (CNG) залежно від вартості та наявності.

Регенеровані масла (RFO) коштують приблизно в двічі менше ніж мазут №2, мають більший енергетичний вміст, ніж дизельне паливо, і горять чисто, що робить їх життєздатними варіантами (NAPA, 2007). Однак, оскільки вони регенеровані, то вимагають додаткового фільтрування для захисту пальника від домішок. Без ретельного збору та фільтрації, захоплені метали, сполуки сірки, зв'язаний азот і

warm. The same tank with 3 inches of insulation would consume 83 % more energy, and a tank without insulation would consume 5600 % more energy. Asphalt mix storage silos should also be well insulated. For all applications, any external insulation should be regularly checked for damage or water intrusion and replaced as necessary. For this purpose, thermal imaging camera technology is typically used to help detect damaged or destroyed insulation.

### 4.3 Production optimization

#### Adjustment of work schedules.

Stoppages and restarts can consume significantly more energy. Reducing them by optimizing the production schedule can save energy. In one particular study in the Netherlands, an asphalt plant reduced the number of restarts by 50 % through better scheduling and planning, resulting in energy savings of 1,5 % [14].

**Alternative fuels.** Most dryer drum burners have the ability to burn liquid and gaseous fuels and switch between them as needed. When natural gas prices are competitive, most plants that have access to natural gas will use it. Plants that are not located near natural gas pipelines may instead switch to fuel oil, refined oil (RFO), propane, liquefied natural gas (LNG) or compressed natural gas (CNG) depending on cost and availability.

Reclaimed fuel oils (RFOs) cost about half the price of No. 2 fuel oil, have a higher energy content than diesel, and burn cleanly, making them viable options (NAPA, 2007). However, because they are regenerated, they require additional filtration to protect the burner from impurities. Without careful collection and filtration, entrapped metals, sulphur compounds, bound nitrogen and halogens can cause problems with the fuel line and burner, including

галогени можуть спричинити проблеми з паливопроводом і пальником, включаючи корозію та підвищені викиди. Також, при застосуванні цього виду палива слід врахувати його вищу в'язкість. У деяких системах пальників для чистого та ефективного спалювання може виникнути необхідність встановлення нагрівача попереднього нагріву для зниження в'язкості палива.

**Альтернативне обладнання.** На сьогоднішній день виробники пропонують широкий спектр можливостей щодо застосування альтернативного обладнання. Деякі виробники пропонують модернізацію техніки шляхом обладнання її приводами з акумуляторним живленням або дизель-електричною гібридною системою. Такі компанії, як Volvo CE, Caterpillar, Bobcat, Doosan, Hyundai CE і JCB розробили та пропонують у своїх модельних рядах електричні екскаватори, колісні навантажувачі та іншу будівельну техніку. І ця тенденція, ймовірно, збережеться, оскільки попит на електричну будівельну техніку зростає, а її експлуатація забезпечує зниження викидів, шуму та витрат на обслуговування.

#### 4.4 Нові види матеріалів

##### 4.4.1 Теплі асфальтобетони

Поширеною практикою є виробництво асфальтобетонних сумішей за температури (150-175)°C для забезпечення оброблюваності та ущільнення. Така підвищена температура призводить до надмірного споживання енергії та передчасного старіння (погіршення властивостей бітуму) гарячої асфальтобетонної суміші, зниження стійкості асфальтобетону до температурного та втомного розтріскування. За результатами наукових досліджень [15], зниження температури приготування суміші дозволяє уникати цих негативних наслідків. Більш низькі виробничі температури зменшують старіння бітуму на етапі виробництва, що може додатково підвищити стійкість асфальтобетону до температурного та втомного розтріскування, а також зменшити споживання енергії. Таку технологію називають «теплий асфальтобетон». Наприклад, у звіті Національної

corrosion and increased emissions. Also, the higher viscosity of this fuel should be taken into account when using this type of fuel. Some burner systems may require a preheater to reduce the viscosity of the fuel to ensure clean and efficient combustion.

**Alternative equipment.** Today, manufacturers offer a wide range of options for using alternative equipment. Some manufacturers offer modernization of equipment by fitting it with battery-powered drives or diesel-electric hybrid systems. Companies such as Volvo CE, Caterpillar, Bobcat, Doosan, Hyundai CE and JCB have developed and offer electric excavators, wheel loaders and other construction equipment in their product lines. And this trend is likely to continue as demand for electric construction equipment grows and its operation reduces emissions, noise and maintenance costs.

#### 4.4 New types of materials

##### 4.4.1 Warm asphalt concrete

It is common practice to produce asphalt mixtures at temperatures of (150-175) °C to ensure workability and compaction. Such an elevated temperature leads to excessive energy consumption and premature aging (deterioration of bitumen properties) of the hot asphalt mixture, as well as a decrease in the resistance of asphalt to thermal and fatigue cracking. According to the results of scientific research [15], lowering the temperature of mix preparation avoids these negative effects. Lower production temperatures reduce the aging of bitumen during the production stage, which can further increase the resistance of asphalt concrete to thermal and fatigue cracking, as well as reduce energy consumption. This technology is called “warm asphalt concrete”. For example, a report by the National Cooperative Highway Research Programme found that plants that used warm mix, operating at or near design capacity, achieved energy savings of 22 % by reducing the mix temperature by an average of 9 °C. They

кооперативної програми досліджень автомобільних доріг було виявлено, що заводи, які використовували теплу суміш, працюючи на проектній потужності або близько до неї, досягли економії енергоносіїв на 22 % завдяки зниженню температури суміші в середньому на 9 °С. Вони підраховали, що приблизно 1 кВт·год енергії можна заощадити на кожному градусі Цельсія на тонну [16].

Тепла асфальтобетонна суміш виготовляється при температурі на (20-40)°С нижчій, ніж традиційні гарячі суміші, при використанні тих самих заповнювачів, бітуму, виробничих установок та обладнання. Різниця полягає в тому, що для зручності оброблювання матеріалів при зниженій температурі використовуються добавки, які зменшують в'язкість бітуму та асфальтобетонної суміші. Використовуються різні методи для зменшення ефективної в'язкості в'язучого, що забезпечує повне покриття ним поверхні заповнювачів і подальші зручноукладальність та ущільнення за понижених температур [17, 18].

Найпоширеніші технології теплового асфальтобетону [19]:

**Хімічні добавки.** Хімічні добавки не змінюють в'язкість бітуму. Як поверхнево-активні речовини вони діють на мікроскопічній межі заповнювачів і бітуму. Вони регулюють і зменшують сили тертя на цій межі в діапазоні температур, як правило, від 140 до 85 °С. Тому можна змішувати бітум і наповнювачі та ущільнювати суміш при нижчій температурі. Хімічні добавки можуть знизити температуру суміші та ущільнення приблизно на 20-40 °С.

**Органічні добавки.** Для зниження в'язкості в'язучого (бітуму) при температурах вище приблизно 90 °С можна використовувати різні органічні добавки. Часто використовуваною добавкою є спеціальний парафін, отриманий шляхом конверсії природного газу, або воски, як природні, так і синтетичні. Органічні добавки зазвичай знижують температуру на 20-30 °С, а також покращують стійкість до деформації модифікованого бітуму і асфальтобетону.

**Спінювання бітуму.** Щоб зменшити в'язкість бітуму, використовується ряд методів спінювання. Для введення невеликої

estimated that approximately 1 kW·h of energy could be saved for every degree Celsius per tonne [16].

Warm asphalt mixes are produced at temperatures (20-40) °C lower than traditional hot mixes, using the same aggregates, bitumen, production plants and equipment. The difference is that additives are used to reduce the viscosity of the bitumen and asphalt mix to facilitate the processing of materials at lower temperatures. Various methods are used to reduce the effective viscosity of the binder, which ensures complete coverage of the aggregate surface and subsequent ease of placement and compaction at lower temperatures [17, 18].

The most common warm asphalt concrete technologies [19]:

**Chemical additives.** Chemical additives do not change the viscosity of bitumen. As surfactants, they act at the microscopic interface between aggregates and bitumen. They regulate and reduce the friction forces at this interface within a temperature range, usually between 140 and 85 °C. Therefore, it is possible to mix bitumen and aggregates and compact the mixture at a lower temperature. Chemical additives can reduce the temperature of the mixture and compaction by about 20-40 °C.

**Organic additives.** Various organic additives can be used to reduce the viscosity of the binder (bitumen) at temperatures above about 90 °C. A commonly used additive is a special paraffin obtained by the conversion of natural gas or waxes, both natural and synthetic. Organic additives usually reduce the temperature by 20-30 °C and also improve the deformation resistance of modified bitumen and asphalt concrete.

**Foaming of bitumen.** A number of foaming methods are used to reduce the viscosity of bitumen. Various means are used to

кількості води в гарячий бітум використовуються різні засоби. Вода перетворюється на пару, збільшує об'єм бітуму і на короткий час знижує його в'язкість. Розширення бітуму дозволяє покривати заповнювачі при більш низьких температурах (можна знизити температуру виробництва), а залишкова вологість сприяє ущільненню асфальтобетонних сумішей на будівельному майданчику. Для спінювання зазвичай використовують два способи:

1. Прямий спосіб спінювання полягає у впорскуванні невеликої контрольованої кількості води в гарячий бітум через пінні форсунки. Це призводить до значного, але тимчасового збільшення ефективного об'єму бітуму, що полегшує нанесення на поверхню заповнювачів за нижчих температур. Деяка кількість пари залишається в бітумі під час ущільнення, знижуючи ефективну в'язкість і полегшуючи ущільнення. При охолодженні в'язкість повертається до нормального стану, оскільки кількість води незначна. Ця техніка дозволяє знизити температуру суміші приблизно від 20 до 40 °С.

2. Спосіб непрямого піноутворення використовує мінерал як джерело піноутворюючої води. Зазвичай використовуються гідрофільні мінерали з родини цеолітів. Вони містять близько 20 відсотків кристалічної води, яка виділяється при температурі вище 100 °С. Це виділення води створює ефект контрольованого піноутворення, що може забезпечити покращену оброблюваність протягом 6-7 годин або доки температура не впаде нижче 100 °С. Піноутворення призводить до покращення технологічності суміші, що згодом може дозволити знизити температуру суміші приблизно на 30 °С з еквівалентною ефективністю ущільнення.

Другий спосіб непрямого піноутворення використовує вологу на піску (або регенованому асфальтобетон (RAP)) для створення природної піни. Крупний заповнювач, який становить близько 80 % складу суміші, сушиться/нагрівається до 130-160 °С, потім покривається бітумом, створюючи таким чином товсту сполучну плівку на крупних частинках. Наступний етап передбачає додавання холодного/мокрого піску. Волога при контакті з гарячим бітумом викликає піноутворення, що сприяє легкому

inject small amounts of water into hot bitumen. The water turns into steam, increases the volume of the bitumen and reduces its viscosity for a short time. The expansion of the bitumen allows aggregates to be coated at lower temperatures (the production temperature can be reduced), and the residual moisture helps to compact asphalt mixtures on the construction site. Two methods are usually used for foaming:

1. The direct foaming method involves injecting a small, controlled amount of water into the hot bitumen through foam nozzles. This results in a significant but temporary increase in the effective volume of the bitumen, which makes it easier to apply aggregates to the surface at lower temperatures. Some vapour remains in the bitumen during compaction, reducing the effective viscosity and facilitating compaction. On cooling, the viscosity returns to normal as the amount of water is negligible. This technique can reduce the temperature of the mixture by around 20 to 40 °C.

2. The indirect foaming method uses a mineral as a source of foaming water. Typically, hydrophilic minerals from the zeolite family are used. They contain around 20 per cent crystalline water, which is released at temperatures above 100 °C. This water release creates a controlled foaming effect that can provide improved machinability for 6-7 hours or until the temperature drops below 100 °C. Foaming results in improved mix workability, which can subsequently allow the mix temperature to be reduced by approximately 30 °C with equivalent compaction performance.

The second indirect foaming method uses moisture in sand (or reclaimed asphalt concrete (RAP)) to create natural foam. The coarse aggregate, which makes up about 80 % of the mix, is dried/heated to 130-160 °C and then coated with bitumen, creating a thick binding film on the coarse particles. The next stage involves the addition of cold/wet sand. Moisture in contact with hot bitumen causes foaming, which facilitates easy application of the binder to cold and wet RAP or fine aggregate (sand). This method of foaming provides the same

нанесенню в'язучого на холодний і вологий RAP або дрібний заповнювач (пісок). Такий спосіб спінювання забезпечує таке ж зниження температури, як і пряме спінювання через сопла, приблизно від 20 до 40 °C.

Окрім вищезгаданих технологій існують також комбіновані продукти, які можна використовувати для виробництва теплої асфальтобетонної суміші, наприклад, палети з волокнами та цеолітом або волокна з органічними добавками.

Серед переваг технології теплої асфальтобетону можна виділити наступне:

- Зменшення використання енергії на 55 % [18] та викидів на 50 % [17]. Фактичні скорочення споживання енергії та викидів залежать від досягнутого зниження температури, конфігурації обладнання, конкретних умов на майданчику та складу суміші.

- Забезпечення більших відстаней перевезення, оскільки нижча початкова температура не дозволить так швидко втрачати тепло під час транспортування [18].

- Збільшення тривалості сезону укладання, оскільки асфальтобетонна суміш залишається працездатною при нижчих температурах [18].

- Покращення ущільнення, що робить поверхню дорожнього покриття більш стійкою до інфільтрації води [18]. Сьогодні багато виробників асфальтобетонних сумішей перейшли на технологію теплої суміші, щоб отримати її неенергетичні переваги, хоча деякі з них все ще виробляють традиційні гарячі суміші [17-19]. Дослідження Національної асоціації асфальтобетонних покриттів (США) показує, що із загального обсягу виробництва сумішей за технологією теплої асфальтобетону виробляється менше ніж 50 %, тому є потенціал застосування цієї технології для підвищення енергоефективності.

#### **4.4.2 Регенований асфальтобетон**

Регенований асфальтобетон (RAP) – це екологічно чисте рішення для будівництва доріг, яке передбачає переробку старого асфальтобетонного покриття замість використання первинних матеріалів. RAP виробляється шляхом фрезерування або дроблення старого асфальтобетону (асфальтовий гранулят) та поєднується з

temperature reduction as direct foaming through nozzles, approximately 20 to 40 °C.

In addition to the above-mentioned technologies, there are also combined products that can be used to produce warm asphalt mixtures, such as pallets with fibers and zeolite or fibers with organic additives.

The advantages of warm asphalt technology include the following:

- Reduced energy use by 55 % [18] and emissions by 50 % [17]. Actual reductions in energy consumption and emissions depend on the temperature reduction achieved, equipment configuration, specific site conditions and mix composition.

- Providing longer transport distances, as lower initial temperatures will prevent heat loss during transport [18].

- Extending the length of the paving season, as the asphalt mix remains workable at lower temperatures [18].

- Improved compaction, which makes the pavement surface more resistant to water infiltration [18]. Today, many asphalt mix producers have switched to warm mix technology to reap its non-energy benefits, although some still produce traditional hot mixes [17-19]. The National Asphalt Pavement Association (USA) study shows that less than 50 % of the total asphalt mix production is produced using warm mix technology, so there is potential for this technology to improve energy efficiency.

#### **4.4.2 Regenerated asphalt concrete**

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is an eco-friendly solution for road construction that involves recycling old asphalt pavement instead of using virgin materials. RAP is produced by milling or crushing the old pavement and combining it with new binder and aggregate to create recycled material. RAP can be used as a base for a new pavement.

новим в'язучим і заповнювачем. RAP може бути використаний як основа для нового покриття.

У виробництві гарячих асфальтобетонних сумішей, складовим компонентом яких є асфальтовий гранулят, додатково висуваються вимоги до таких показників: гранулометрія мінеральних матеріалів у асфальтовому грануляті, а у разі необхідності й інші показники якості; кількість в'язучого в асфальтовому грануляті і значення його в'язкості. Враховуючи властивості цієї сировини, необхідно підібрати оптимальний склад гарячої асфальтобетонної суміші. При цьому слід звертати увагу на те, що важливим критерієм визначення максимальної кількості асфальтового грануляту в суміші є його однорідність.

Основна особливість підбору складу асфальтобетонної суміші полягає в тому, що властивості суміші старого і нового бітуму мають відповідати вимогам до бітуму, призначеного для типу проекрованої суміші. У низці країн діють обмеження щодо в'язкості старого бітуму. Так, наприклад, рекомендовано застосовувати асфальтовий гранулят, в якому старий бітум характеризується пенетрацією за 25 °C від 10 до 15 градусів, (середнє значення для 5 вимірів). При цьому передбачено, що асфальтобетон, який містить асфальтовий гранулят, повинен мати такі самі властивості, як традиційний асфальтобетон.

Існує декілька методів введення асфальтового грануляту до нових матеріалів, що дає змогу змінювати гранулометричний склад самої суміші і асфальтового грануляту, на виході отримуючи гарячі асфальтобетонні суміші для різних шарів дорожнього одягу.

За **холодним методом** на заводах без додаткового сушильного барабану асфальтовий гранулят попередньо не нагрівається в окремому сушильному барабані, а вводиться через ваговий дозатор безпосередньо у асфальтозмішувач на нагріті до необхідної температури нові матеріали. При цьому утворюється пара, яку вилучають через систему збирання і видалення пилу на заводі. У таких випадках максимальну температуру процесу змішування складових обмежують, щоб уникнути можливого пошкодження окремих вузлів заводу. Як

In the production of hot asphalt concrete mixtures, the constituent component of which is asphalt granulate, additional requirements are imposed on the following indicators: granulometry of mineral materials in asphalt granulate, and if necessary, other quality indicators; the amount of binder in asphalt granulate and the value of its viscosity. Taking into account the properties of this raw material, it is necessary to select the optimal composition of the hot asphalt concrete mixture. In this case, it should be noted that an important criterion for determining the maximum amount of asphalt granulate in the mixture is its homogeneity.

The main feature of selecting the composition of the asphalt concrete mixture is that the properties of the mixture of old and new bitumen must meet the requirements for the bitumen intended for the type of designed mixture. In a number of countries, restrictions apply to the viscosity of old bitumen. For example, it is recommended to use asphalt granulate in which the old bitumen is characterized by penetration at 25 °C from 10 to 15 degrees (average value for 5 measurements). It is stipulated that asphalt concrete containing asphalt granulate must have the same properties as traditional asphalt concrete.

There are several methods for introducing asphalt granulate into new materials, which allows you to change the particle size composition of the mixture itself and the asphalt granulate, resulting in hot asphalt concrete mixtures for different layers of road surface.

In the **cold method**, in plants without an additional drying drum, the asphalt granulate is not preheated in a separate drying drum, but is fed directly into the asphalt mixer via a weighing feeder with new materials heated to the required temperature. This produces steam, which is removed through the dust collection and removal system at the plant. In such cases, the maximum temperature of the mixing process of the components is limited to avoid possible damage to individual plant components. As a rule, 10 to 20% of asphalt granulate by weight is fed into the asphalt mixer.

правило, в асфальтозмішувач вводять від 10 до 20 % асфальтового грануляту за масою.

Асфальтовий гранулят можна вводити до дозувальних відділень мінеральних матеріалів через окремий дозатор. Це дає змогу розсіювати новий мінеральний матеріал без будь-якого впливу асфальтового грануляту на гранулометричний склад. Щоби запобігти окисненню нового в'язучого, яке вводять в асфальтозмішувач, рекомендується перемішувати новий мінеральний матеріал з асфальтовим гранулятом перед додаванням в'язучого у суміш.

На заводах з окремим сушильним барабаном (**гарячий метод**) асфальтовий гранулят попередньо висушують і нагрівають до температури близько 130 °C. Після цього його як окремий компонент суміші подають за допомогою дозувального устаткування у змішувач і перемішують із новим мінеральним матеріалом, нагрітим до вищої температури, щоб результуюча температура суміші становила близько 160 °C. У такому випадку кількість грануляту в гарячій суміші може складати від 50 до 80 % за масою.

Щоб запобігти старінню бітуму перед його додаванням у гарячу асфальтобетонну суміш, суміш асфальтового грануляту і нових мінеральних матеріалів перемішують протягом приблизно 10 секунд. При цьому загальна тривалість перемішування збільшується, а продуктивність заводу дещо зменшується порівняно зі приготуванням традиційних гарячих сумішей.

Разом з тим, варто зазначити, вітчизняні нормативні документи, що регламентують застосування RAP [20] обмежують кількість асфальтового грануляту в суміші не більше ніж 20 % за масою. Деякі закордонні нормативи (наприклад, [21]) обмежують кількість асфальтового грануляту в суміші в кількості до 20 % за масою – для покриття і не більше ніж 50 % за масою – для шарів основи. Таке обмеження впливає із результатів багатьох досліджень, оскільки, додавання більшої кількості асфальтового грануляту понад 50 % за масою призводить за суттєвого різкого погіршення фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону [22, 23].

Asphalt granulate can be fed into the mineral material dosing compartments via a separate dosing device. This allows the new mineral material to be dispersed without any influence of the asphalt granulate on the particle size distribution. In order to prevent oxidation of the new binder introduced into the asphalt mixer, it is recommended to mix the new mineral material with the asphalt granulate before adding the binder to the mixture.

In plants with a separate drying drum (**hot method**), the asphalt granulate is pre-dried and heated to a temperature of about 130 °C. After that, it is fed as a separate component of the mixture via dosing equipment into the mixer and mixed with the new mineral material heated to a higher temperature so that the resulting mixture temperature is about 160 °C. In this case, the amount of granulate in the hot mixture can be from 50 to 80 % by weight.

To prevent bitumen from aging before adding it to the hot mix, the mixture of asphalt granulate and new mineral materials is mixed for approximately 10 seconds. This increases the total mixing time and slightly reduces the plant's productivity compared to traditional hot mix preparation.

However, it is worth noting that domestic regulatory documents regulating the application of RAP [20] limit the amount of asphalt granulate in the mixture to no more than 20 % by weight. Some foreign standards (for example, [21]) limit the amount of asphalt granulate in the mixture to 20 % by weight – for the coating and no more than 50 % by weight – for the base layers. This limitation follows from the results of many studies, since adding a larger amount of asphalt granulate than 50 % by weight leads to a significant sharp deterioration in the physical and mechanical characteristics of reclaimed asphalt concrete [22, 23].

Транспортування й укладання гарячої асфальтобетонної суміші, виготовленої з асфальтового грануляту, не відрізняються від традиційної технології.

Transportation and laying of hot asphalt concrete mix made from asphalt granulate do not differ from traditional technology.

## РОЗДІЛ 5. ІНВЕСТИЦІЙНА ОЦІНКА ПРОЄКТІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

### 5.1 Основи управління проєктами

**Інвестиційний аналіз** – вивчення та оцінка економічних і ринкових тенденцій, перспектив отримання прибутку, коефіцієнтів дохідності та інших показників і факторів для визначення відповідних інвестиційних стратегій [24].

Будь-яке рішення, що вимагає використання ресурсів (фінансових чи інших), є проєктом.

Проєкти можуть мати різну природу:

- широкі стратегічні рішення (вихід у нові сфери бізнесу, на нові ринки);
- тактичні рішення (відкриття нової філії);
- управлінські рішення (асортимент продукції, рівень запасів);
- рішення щодо надання необхідної послуги (вибір виготовити або купити).

Проєктами керують менеджери – фахівці, які професійно займаються управлінською діяльністю в конкретній області функціонування підприємства і приймають рішення відповідно до свого рівня в організаційній ієрархії з метою реалізації поставлених цілей.

**Рівень управління** визначається як вертикальний ранг менеджерів в організації [25]. Менеджери кожного рівня мають різні завдання та обов'язки. Існує три різні рівні управління в організації (рис. 5.1):

- вищий (виконавчий) – вирішує задачі стратегічного менеджменту;
- середній – вирішує задачі тактичного менеджменту;
- нижчий (наглядовий) вирішує задачі оперативного менеджменту.

Повноваження передаються від вищого рівня до середнього і від середнього до нижчого рівня управління. Після досягнення мети нижчий рівень звітує перед середнім, а середній – перед вищим рівнем управління.

## CHAPTER 5. INVESTMENT ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECTS

### 5.1 Basics of project management

**Investment analysis** is the study and assessment of economic and market trends, profit prospects, profitability ratios and other indicators and factors to determine appropriate investment strategies [24].

Any solution that requires the use of resources (financial or other) is a project.

Projects can be of different nature:

- broad strategic decisions (entering new business areas, new markets);
- tactical decisions (opening a new branch);
- management decisions (product range, stock levels);
- decisions on the provision of the required service (the choice to produce or buy).

Projects are managed by managers – specialists who are professionally engaged in management activities in a specific area of the enterprise's operation and make decisions in accordance with their level in the organisational hierarchy in order to achieve the set goals.

**Management level** is defined as the vertical rank of managers in an organisation [25]. Managers at each level have different tasks and responsibilities. There are three different levels of management in an organisation (Figure 5.1):

- top (executive) – solves strategic management tasks;
- middle – solves the tasks of tactical management;
- lower (supervisory) – solves the tasks of operational management.

Authority is transferred from the top level to the middle level and from the middle level to the lower level of management. Once the goal is achieved, the lower level reports to the middle level, and the middle level reports to the top level.



Рисунок 5.1 – Рівні управління

Figure 5.1 – Levels of management

**Управління проєктами** – це процес планування, організації й контролю за завданнями та ресурсами з метою досягнення певної мети, зазвичай за наявності обмежень за часом, ресурсами або витратами.

У Всесвітньому банку (World Bank) і підрозділі ООН UNIDO (United Nations Industrial Development Organization – Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку) процес проходження проєкту поділений на фази (рис. 5.2).

**Project management** is the process of planning, organising, and controlling tasks and resources to achieve a specific goal, usually within time, resource, or cost constraints.

At the World Bank and the UN agency UNIDO (United Nations Industrial Development Organisation), the project process is divided into phases (Figure 5.2).

## 5.2 Поточна вартість

Є три основні причини, чому певна сума грошей завтра коштує менше, ніж сьогодні [24]:

1. Люди віддають перевагу теперішньому споживанню перед майбутнім. Щоб спонукати людей відмовитися від теперішнього споживання, ви повинні запропонувати їм більше в майбутньому.

2. Вартість грошей зменшується з часом внаслідок інфляції. Що більша інфляція, то більша різниця у вартості між певною сумою грошей сьогодні і завтра.

3. Якщо існує будь-яка невизначеність (ризик), пов'язана з грошовим потоком у

## 5.2 Present value

There are three main reasons why a certain amount of money is worth less tomorrow than it is today [24]:

1. People prefer present consumption to future consumption. To get people to give up their present consumption, you have to offer them more in the future.

2. The value of money decreases over time due to inflation. The higher the inflation rate, the greater the difference in value between a certain amount of money today and tomorrow.

3. If there is any uncertainty (risk) associated with a cash flow in the future, the less that cash flow will be valued.

майбутньому, тим менше цей грошовий потік буде оцінений.

Цінність грошових потоків у майбутніх періодах зменшується, оскільки:

- перевага поточного споживання зростає;
- очікувані темпи інфляції зростають;
- зростає невизначеність у грошовому потоці.

Для того, щоб врахувати всі вищезгадані фактори, використовується поняття «ставка дисконтування».

The value of cash flows in future periods decreases because:

- the preference for current consumption increases;
- the expected rate of inflation increases;
- uncertainty in the cash flow increases.

In order to take into account all the above factors, the concept of “discount rate” is used.

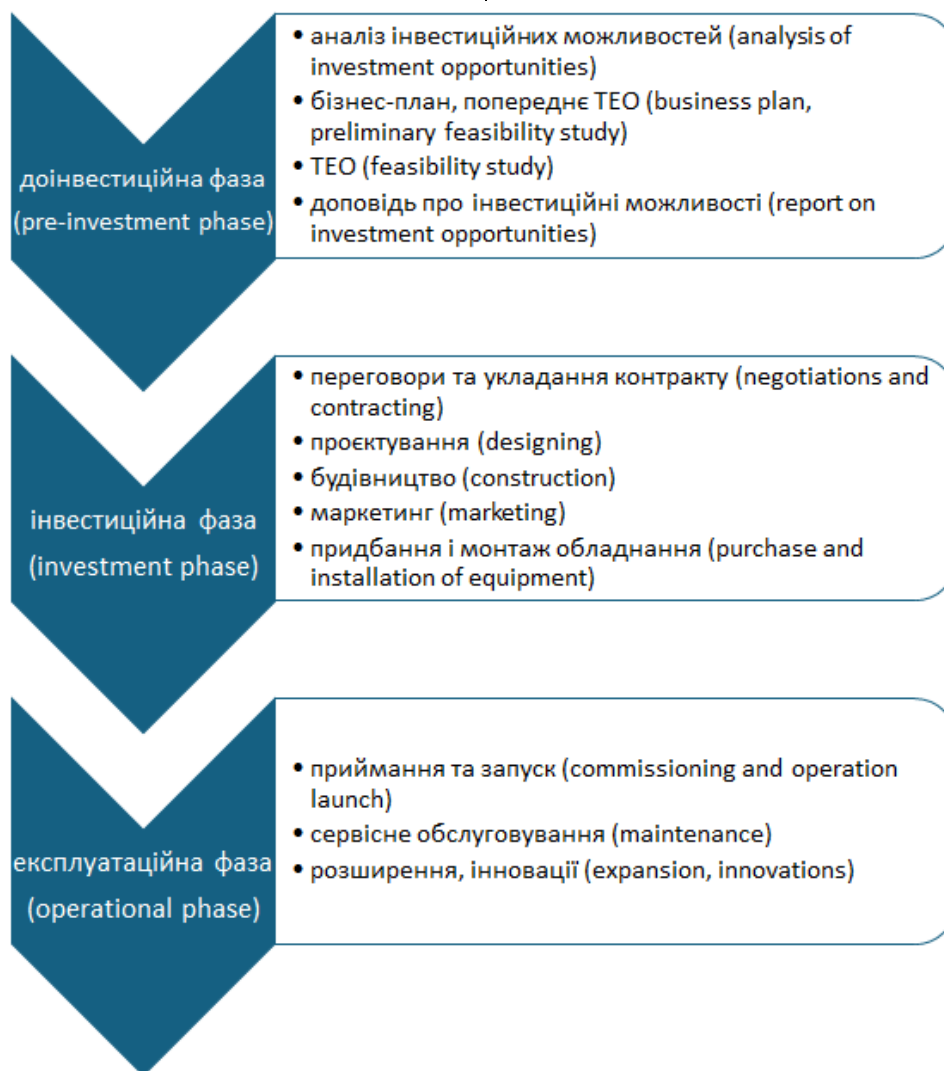


Рисунок 5.2 – Фази проектного циклу

Figure 5.2 – Phases of the project cycle

**Ставка дисконтування** – це ставка, за якою порівнюються теперішні та майбутні грошові потоки. Вона включає в себе: перевагу поточного споживання, інфляцію, невизначеність у майбутньому тощо.

Вища ставка дисконтування призведе до нижчої вартості грошових потоків у майбутньому. Ставка дисконтування також є

**The discount rate** is the rate at which present and future cash flows are compared. It takes into account the preference for current consumption, inflation, future uncertainty, etc.

A higher discount rate will result in a lower value of cash flows in the future. The discount rate is also an opportunity cost because

альтернативною вартістю, оскільки вона відображає дохід, який особа могла б отримати від наступної найкращої можливості.

Поняття компаундування та дисконтування схожі. Дисконтування приводить майбутню суму грошей до теперішнього часу за допомогою ставки дисконтування, а компаундування приводить теперішню суму грошей до майбутнього часу (рис. 5.3).

it reflects the income that a person could receive from the next best opportunity.

The concepts of compounding and discounting are similar. **Discounting** brings a future amount of money to the present by using a discount rate, while **compounding** brings a present amount of money to a future time (Figure 5.3).

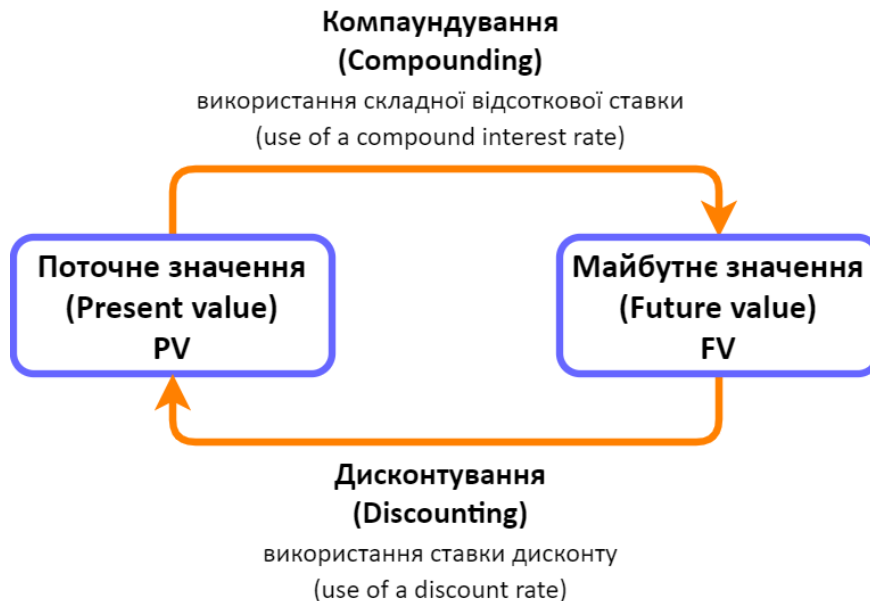


Рисунок 5.3 – Компаундування та дисконтування

Figure 5.3 – Compounding and discounting

Формула компаундування (формула складних відсотків):

Compounding formula (formula of compound interest):

$$FV = PV \cdot \left(1 + \frac{r}{n}\right)^{n \cdot t} \quad (5.1)$$

де  $FV$  – майбутня вартість інвестиції;  
 $PV$  – початкова сума інвестиції (поточна вартість);  
 $r$  – відсоткова ставка за період;  
 $n$  – кількість періодів компаундування в році;  
 $t$  – кількість років.

where  $FV$  is the future value of the investment;  
 $PV$  – initial amount of investment (present value);  
 $r$  – interest rate for the period;  
 $n$  – number of compounding periods in a year;  
 $t$  – number of years.

Формула дисконтування:

Discounting formula:

$$PV = FV \cdot \frac{1}{(1 + r)^t} \quad (5.2)$$

де  $PV$  – теперішня (поточна) вартість;  
 $FV$  – майбутня вартість;  
 $r$  – ставка дисконтування;  
 $t$  – кількість років.

**Основний принцип поточної вартості:** грошові потоки в різні моменти часу не можна порівнювати та додавати. Усі грошові потоки мають бути приведені до одного моменту часу, перш ніж здійснювати порівняння та додавання.

#### Що таке «інфляція»?

**Інфляція** – це зростання з часом середніх цін на товари та послуги.

**Дефляція** – це протилежність інфляції, тобто ціни знижуються з часом (тобто рівень інфляції падає нижче 0%).

Інфляція (та/або дефляція) змінює грошові потоки, пов'язані з будь-яким проектом, який здійснюється протягом певного періоду часу.

Інфляція (та/або дефляція) може бути кількісно виміряна за допомогою **індексу споживчих цін ІСЦ** (або **CPI** – consumer price index), який відображає середню зміну цін на кошик товарів за певний період. ІСЦ дозволяє відрізнити реальну вартість (тобто віднесену до певного року) від номінальної вартості валюти (тобто віднесеної до фактичної вартості відповідного року).

#### Розрахунок поточної вартості

Поточну вартість відкладеної виплати можна знайти, помноживши виплату на коефіцієнт дисконтування. Якщо ми знаходимося в періоді 0, а  $C_1$  позначає очікувану вигоду в періоді 1 (отже, через рік), тоді:

$$PV = DF \cdot C_1 \quad (5.3)$$

де  $PV$  – поточна вартість;  
 $DF$  – коефіцієнт дисконтування:

$$DF = \frac{1}{1 + r} \quad (5.4)$$

де  $r$  – задана норма прибутку.

Поточна вартість грошового потоку через два роки може бути записана подібним чином:

$$PV = \frac{C_2}{(1 + r)^2} \quad (5.5)$$

where  $PV$  is the present (current) value;  
 $FV$  – future value;  
 $r$  – discount rate;  
 $t$  – number of years.

**The basic principle of present value** is that cash flows at different points in time cannot be compared and added. All cash flows must be brought to the same point in time before comparisons and additions can be made.

#### What is inflation?

**Inflation** is the increase over time in the average price of goods and services.

**Deflation** is the opposite of inflation, meaning that those prices decrease over time (that is, inflation rate falls below 0%).

Inflation (and/or deflation) changes the cash flows associated with any project that is undertaken over a period of time.

Inflation (and/or deflation) can be quantified by the **consumer price index (CPI)**, which reflects the average change in prices for a basket of goods over a period of time. The CPI allows us to distinguish between the real value (i.e., the value attributed to a particular year) and the nominal value of a currency (i.e., the value attributed to the actual value of the relevant year).

#### Calculation of the present value

The present value of the deferred benefit can be found by multiplying the benefit by the discount factor. If we are in period 0 and  $C_1$  denotes the expected benefit in period 1 (i.e., one year from now), then:

where  $PV$  is the present value;  
 $DF$  – discount factor:

where  $r$  is the given rate of return.

The present value of the cash flow after two years can be written in a similar way:

Однією з переваг поточної вартості є те, що вона виражається в теперішніх цінах, тому її можна додавати. Іншими словами, поточна вартість грошового потоку А+В дорівнює поточній вартості грошового потоку А плюс поточна вартість грошового потоку В:

$$PV = \frac{C_1}{1 + r_1} + \frac{C_2}{(1 + r_2)^2} \quad (5.6)$$

Очевидно, що ми можемо продовжувати в такий спосіб знаходити теперішню вартість розширеного потоку грошових потоків:

$$PV = \frac{C_1}{1 + r_1} + \frac{C_2}{(1 + r_2)^2} + \frac{C_3}{(1 + r_3)^3} + \dots \quad (5.7)$$

А формулу дисконтованого грошового потоку (*DCF*) можна отримати як:

$$DCF = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + r_t)^t} \quad (5.8)$$

One of the advantages of present value is that it is expressed in present prices, so it can be added up. In other words, the present value of cash flow A+B is equal to the present value of cash flow A plus the present value of cash flow B:

Obviously, we can continue to find the present value of the expanded cash flow in this way:

And the discounted cash flow (*DCF*) formula can be obtained as follows:

### 5.3 Інвестиційна оцінка проєкту

#### 5.3.1 Загальні поняття

Вартісний аналіз використовується для оцінки потенційних вигод інвестиції або для об'єктивної оцінки вартості бізнесу чи активу.

Вартісний аналіз є одним із основних обов'язків інвестора, оскільки оцінка (разом з грошовими потоками), як правило, є найбільш важливими факторами, що визначають ціни на активи в довгостроковій перспективі.

Вартісний аналіз повинен дати відповідь на просте, але життєво важливе питання: скільки щось коштує? Аналіз ґрунтується або на поточних даних, або на прогнозах на майбутнє.

Щоб оцінити проєкт, необхідно визначити його грошові потоки, тому дуже важливо оцінити [24]:

- початкові інвестиції (CAPEx);
- операційний грошовий потік протягом життя проєкту (OPEx);

### 5.3 Investment valuation of a project

#### 5.3.1 General concepts

Valuation analysis is used to assess the potential benefits of an investment or to objectively evaluate the value of a business or asset.

Valuation analysis is one of the primary responsibilities of an investor, as valuation (along with cash flows) are typically the most important factors that determine asset prices over the long term.

Valuation analysis should answer a simple but vital question: how much is something worth? The analysis is based on either current data or future projections.

To evaluate a project, it is necessary to determine its cash flows, so it is very important to estimate [24]:

- initial investment (CAPEx);
- operating cash flow over the project life (OPEx);

- грошовий потік у кінцевому році;
- показник ефективності.

Фінансовий аналіз інвестицій, як правило, складається з двох етапів [26]:

1. Визначення грошових потоків проєкту.

2. Дисконтування грошових потоків. Результатом такого підходу є набір фінансових показників, що використовуються для оцінки проєкту, таких як чиста приведена вартість (NPV) та внутрішня норма рентабельності (внутрішня норма прибутку) (IRR).

**Грошовий потік** (англ. cash flow) – сукупність розподілених у часі надходжень і видатків грошових коштів та їх еквівалентів, генерованих підприємством у процесі господарської діяльності [27]. З точки зору бухгалтерського обліку грошовий потік визначається як чистий рух грошових коштів за звітний період. Показник розраховується як різниця між усіма надходженнями та витратами грошових коштів на підприємстві. Надходження формують додатний (або позитивний) грошовий потік, а витрачання – від’ємний (або негативний).

Для власника будинку типовими грошовими надходженнями є економія на рахунках за енергоносії завдяки зменшенню енергоспоживання та/або переходу на дешевші джерела енергії. Також слід враховувати будь-які надходження від підвищення енергоефективності, такі як зменшення податків на нерухомість внаслідок підвищення енергетичного класу. Основними грошовими відтоками для власника житла є погашення заборгованостей та відсотків, але можуть також включати витрати, пов’язані з обслуговуванням впроваджених заходів із енергоефективності, наприклад, нової системи опалення [26].

Для комунального підприємства або фінансової установи відтік грошових коштів складатиметься здебільшого з виданих кредитів, що покривають частину або всі початкові інвестиції, а притоки грошових коштів включатимуть відповідні стягнуті борги та відсотки. У той час як основними відтоками грошових коштів для уряду можуть бути субсидії, пов’язані з оплатою рахунків, внески до гарантійних фондів або навіть тренінги, що надаються комунальним

– cash flow in the terminal (final) year;

- performance indicator.

Financial analysis of investments usually consists of two stages [26]:

1. Determination of the project’s cash flows.

2. Discounting of cash flows. The result of this approach is a set of financial indicators used to evaluate the project, such as net present value (NPV) and internal rate of return (IRR).

**Cash flow** is a set of time-distributed cash receipts (inflows) and expenditures (outflows) and their equivalents generated by an enterprise in the process of its economic activity [27]. From the accounting point of view, cash flow is defined as net cash flows for the reporting period. The indicator is calculated as the difference between all cash receipts and cash outlays at the enterprise. Receipts form a positive cash flow, while expenditures form a negative cash flow.

For a building owner, the typical cash flows are savings on energy bills due to reduced energy consumption and/or switching to cheaper energy sources. Any gains from energy efficiency improvements, such as reduced property taxes due to an energy class upgrade, should also be considered. The main cash outflows for the homeowner are debt and interest repayments, but may also include costs associated with the maintenance of the energy efficiency measures implemented, such as a new heating system [26].

For a utility or financial institution, cash outflows will consist mainly of loans issued to cover part or all of the initial investment, while cash inflows will include related collected debt and interest. While the main cash outflows for the government may be on-bill related subsidies, guarantee fund contributions or even training provided to utilities or construction companies, cash inflows are much more difficult to identify. For this purpose, it is important to focus on revenues from non-energy benefits, and

підприємствам чи будівельним компаніям, притоки грошових коштів визначити набагато складніше. Для цього важливо зосередити увагу на надходженнях від неенергетичних пілг, і особливо на пілгах, що виходять за рамки збільшення збору податку на додану вартість або податку на прибуток, що може мати вирішальне значення [26].

Початкові інвестиції – це форма відтоку грошових коштів, що зазвичай розподіляється між кількома учасниками проекту і включає всі витрати, необхідні для реалізації проекту. Енергетична реновація, як правило, пов'язана з витратами на заміщення, необхідними для заміни існуючих машин/обладнання новими, при цьому особливу увагу слід приділяти можливому притоку грошових коштів від залишкової вартості заміненого обладнання [26].

Фінансовий аналіз повинен охоплювати весь життєвий цикл проекту і, як правило, проводиться на щорічній основі. Типова структура грошових потоків інвестиційних проектів передбачає високий початковий відтік через інвестиційні витрати, а також низку щорічних чистих грошових потоків, що дорівнюють притоку грошових коштів за вирахуванням відтоку грошових коштів. Періодичність грошових потоків заслуговує на особливу увагу – вона може бути щорічною у випадку енергозбереження або дворічною у випадку витрат на технічне обслуговування [26].

**Ставка дисконтування.** Як правило, ставка дисконтування – це необхідна норма прибутку на інвестиції, і як така вона суттєво залежить від ринку, на якому оцінюються інвестиції. Ставку дисконтування також можна розглядати як відсоткову ставку, яку інвестор – фірма або фізична особа – може отримати, вкладаючи кошти в інше місце з аналогічним рівнем ризику; в цьому випадку виникає питання про альтернативні витрати проекту [26].

Оскільки різні учасники проекту можуть мати різні інтереси в одному і тому ж проекті, вони можуть використовувати різні ставки дисконтування для дисконтування своїх грошових потоків. Наприклад, комунальне підприємство, яке бере участь у проекті з оплатою за рахунками, може бути зацікавлене в тому, як він працює порівняно з

especially on the benefits beyond an increased collection of VAT or profit tax, which may be crucial [26].

Initial investment is a form of cash outflow, usually shared among several project participants, and includes all costs required to implement the project. Energy renovation is usually associated with the replacement costs required to replace existing machinery/equipment with new ones, with special attention paid to the possible cash inflow from the residual value of the replaced equipment [26].

Financial analysis should cover the entire project life cycle and is typically performed on an annual basis. The typical cash flow structure of investment projects involves a high initial outflow due to investment costs, as well as a series of annual net cash flows equal to cash inflows minus cash outflows. The frequency of cash flows deserves special attention – it can be annual in the case of energy savings or biennial in the case of maintenance costs [26].

**Discount rate.** Generally, the discount rate is the required rate of return on an investment and, as such, is highly dependent on the market in which the investment is valued. The discount rate can also be considered as the interest rate that an investor – a firm or an individual – can earn by investing elsewhere with a similar level of risk; in this case, the question of the opportunity cost of the project arises [26].

Since different project participants may have different interests in the same project, they may use different discount rates to discount their cash flows. For example, a utility contributing to an on-bill project may be interested in how it performs compared to non-energy efficiency investments such as government bonds, and may therefore use the interest rate on the bonds as a

інвестиціями, не пов'язаними з енергоефективністю, такими як державні облигації, і тому може використовувати відсоткову ставку за облигаціями як ставку дисконтування. Фінансист, який надає кредит, може порівняти внутрішню норму прибутку від енергозбереження з відсотковою ставкою за кредитом, щоб підтвердити фінансовий ризик проєкту. Такий самий підхід до оцінки ризиків може бути використаний урядом при розгляді питання про створення гарантійного фонду для підтримки інвестиційної схеми з використанням векселів [26].

### 5.3.2 Фінансові показники

#### Чиста поточна вартість (NPV).

Чиста поточна (приведена) вартість (NPV – net present value) – це сума початкових інвестицій (INV) та дисконтованих майбутніх грошових потоків (DCF), що виникають протягом терміну експлуатації проєкту з енергоефективності [26]. NPV розраховується наступним чином:

$$NPV = -INV + DCF = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (5.9)$$

де  $n$  – кількість років у життєвому циклі проєкту;

$CF_0$  – початковий грошовий потік;

$CF_t$  – грошовий потік у році  $t$ ;

$r$  – ставка дисконтування.

Показник NPV відображає вартість заощаджень понад суму початкової інвестиції, тобто якщо його значення більше нуля, то інвестиція є прибутковою. NPV виражається в грошовій формі і залежить від розміру початкових інвестицій, тобто більші інвестиції дають більшого значення NPV. Проєкти слід розглядати, починаючи з того, який має найвищу NPV [26].

NPV проєкту – це один із способів вивчення витрат (відтоку грошових коштів) і доходів (притоку грошових коштів) одночасно.

Аналіз NPV може складатися з багатьох різних потоків витрат і доходів, кожен з яких має свою теперішню вартість (PV).

Аналітик повинен знати форму різних потоків (в поточних або постійних цінах), щоб використовувати правильну ставку

discount rate. A financier providing the loan can compare the internal rate of return on energy savings with the interest rate on the loan to confirm the financial risk of the project. The same approach to risk assessment can be used by the government when considering the establishment of a guarantee fund to support an on-bill investment scheme [26].

### 5.3.2 Financial indicators

**Net present value (NPV).** The net present value (NPV) is the sum of the initial investment (INV) and the discounted future cash flows (DCF) occurring during the operating life of the energy efficiency project [26]. NPV is calculated as follows:

where  $n$  is the number of years in the project's operating life;

$CF_0$  – initial cash flow;

$CF_t$  – cash flow in year  $t$ ;

$r$  – discount rate.

The NPV reflects the value of savings beyond the initial investment, i.e. if it is greater than zero, the investment is profitable. The NPV is expressed in monetary terms and depends on the size of the initial investment, i.e. larger investments result in a higher NPV. Projects should be considered starting from the one with the highest NPV [26].

The NPV of a project is one way of looking at costs (cash outflows) and revenues (cash inflows) simultaneously.

An NPV analysis can consist of many different cost and revenue streams, each with its own present value (PV).

The analyst needs to know the form of the different streams (in current or constant

дисконтування для аналізу теперішньої вартості.

Аналіз NPV рекомендується при оцінці інвестиційних характеристик і рішень, таких як взаємовиключні проєкти і соціальні витрати.

Також рекомендується використовувати NPV у більшості інших оцінок, зокрема, як вторинний показник для перевірки достовірності будь-якого первинного показника [24].

**Внутрішня норма рентабельності (IRR).** Внутрішня норма рентабельності (прибутку) (IRR – internal rate of return) – це ставка дисконтування, яка робить чисту поточну вартість (NPV) всіх грошових потоків рівною нулю [26]:

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} = 0 \quad (5.10)$$

де  $IRR$  – внутрішня норма рентабельності.

$IRR$  є відносним показником прибутковості, який показує відсоток прибутку на одиницю інвестованого капіталу та дозволяє порівнювати різні інвестиції незалежно від їх розміру.

$IRR$  зазвичай використовується для прийняття рішень про прийняття/відхилення, дозволяючи швидко порівняти з мінімально прийнятною нормою прибутку (пороговою ставкою). Правило прийняття рішення тут полягає в тому, щоб прийняти всі інвестиції, які мають  $IRR$ , вищий за необхідну норму прибутку. Тобто життєздатність проєкту зазвичай оцінюється шляхом порівняння  $IRR$  проєкту з «пороговою ставкою», яка представляє собою  $IRR$  наступної найкращої альтернативи (альтернативна вартість капіталу).

Перевага  $IRR$  також полягає в тому, що її можна використовувати для прямого порівняння прибутковості після сплати податків із легкодоступними фінансовими інструментами, такими як облігації, таким чином, надаючи інвестору швидко якісну оцінку проєкту [24].

З фінансової точки зору, NPV пропонується як основний метод вибору між різними проєктами, в той час як  $IRR$  може

prices) in order to use the correct discount rate for the present value analysis.

NPV analysis is recommended when evaluating investment characteristics and decisions, such as mutually exclusive projects and social costs.

It is also recommended to use NPV in most other evaluations, in particular as a secondary measure to test the reliability of any primary measure [24].

**Internal rate of return (IRR).** The internal rate of return (IRR) is the discount rate that makes the net present value (NPV) of all cash flows equal to zero [26]:

where  $IRR$  is the internal rate of return.

$IRR$  is a relative measure of profitability that shows the percentage of return per unit of invested capital and allows for comparison of different investments regardless of their size.

$IRR$  is commonly used for acceptance/rejection decisions, allowing for a quick comparison with a minimum acceptable rate of return (threshold rate). The rule of thumb here is to accept all investments that have an  $IRR$  higher than the required rate of return. In other words, the viability of a project is usually assessed by comparing the  $IRR$  of the project with the “threshold rate”, which is the  $IRR$  of the next best alternative (the opportunity cost of capital).

The advantage of  $IRR$  is that it can also be used to directly compare after-tax returns with readily available financial instruments such as bonds, thus providing investors with a quick qualitative assessment of a project [24].

From a financial perspective, NPV is proposed as the primary method for choosing between different projects, while  $IRR$  can be

бути використаний для доповнення аналізу NPV [26]. IRR може допомогти у виборі проєктів з аналогічною NPV та аналогічним інвестованим капіталом або може бути використана для визначення запасу міцності проєкту шляхом порівняння різниці між IRR та мінімально необхідною прибутковістю.

### Термін окупності

*Термін окупності (англ. payback period)* – це час, необхідний для відшкодування інвестиційних витрат, тобто для досягнення точки беззбитковості.

*Дисконтований термін окупності (DPP)* – це кількість років, необхідних для відшкодування вартості інвестицій у проєкт з урахуванням вартості грошей у часі:

$$DPP = n, \text{ при якому (at which) } NPV = 0 \quad (5.11)$$

тобто

$$DPP = n, \text{ при якому (at which) } \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} = CF_0 \quad (5.12)$$

Дисконтований термін окупності завжди довший, ніж простий термін окупності на ставку дисконтування.

DPP рекомендується використовувати, коли існує ризик, оскільки він дозволяє швидко оцінити тривалість періоду, протягом якого капітал інвестора перебуває під загрозою.

DPP не рекомендується використовувати при виборі між взаємовиключними альтернативами, оскільки не враховуються різні розміри інвестицій [24].

**Індекс рентабельності (PI).** *Індекс рентабельності (Profitability Index – PI)*, також відомий як коефіцієнт прибутковості інвестицій (PIR) та коефіцієнт вартості інвестицій (VIR), є відношенням суми дисконтованих грошових потоків до початкових інвестицій запропонованого проєкту:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{CF_0} \quad (5.13)$$

Це корисний інструмент для ранжування проєктів, оскільки він дозволяє кількісно оцінити обсяг цінності, створеної на одиницю інвестицій [24].

used to complement NPV analysis [26]. IRR can help in selecting projects with similar NPV and similar invested capital, or it can be used to determine the safety margin of a project by comparing the difference between IRR and the minimum required return.

### Payback period

*The payback period* is the amount of time required to recover the costs of an investment, or to reach the break-even point.

*The discounted payback period (DPP)* is the number of years required to recover the cost of investment in a project while accounting for the time value of money:

The discounted payback period is always longer than the simple payback period times the discount rate.

The DPP is recommended for use when there is risk, as it allows for a quick assessment of the length of time that an investor's capital is at risk.

The DPP is not recommended for use when choosing between mutually exclusive alternatives, as it does not take into account different investment sizes [24].

**Profitability index (PI).** *The profitability index (PI)*, also known as the *profit investment ratio* (PIR) and the *value investment ratio* (VIR), is the ratio of the sum of discounted cash flows to the initial investment of a proposed project:

It is a useful tool for ranking projects, as it quantifies the amount of value created per unit of investment [24].

Індекс рентабельності рівний 1 означає беззбитковість. Будь-яке значення, менше одиниці, вказує на те, що PV проекту є меншою за початкові інвестиції. Зі збільшенням значення індексу рентабельності зростає і фінансова привабливість запропонованого проекту.

Таким чином, критерій PI має перевагу при виборі одного проекту з низки тих, які мають приблизно однакові значення NPV, але різні обсяги необхідних інвестицій. У цьому разі вигіднішим є той із них, який забезпечує більшу ефективність вкладень. Тому цей показник дає змогу ранжувати проекти за обмежених інвестиційних ресурсів.

**Вирівняна вартість електроенергії (LCOE).** Вирівняна вартість електроенергії (*levelized cost of electricity – LCOE*) являє собою середній дохід на одиницю виробленої електроенергії (наприклад, грн./кВт·год), необхідний для відшкодування витрат на будівництво (CAPEX) та експлуатацію (OPEX) електростанції протягом передбачуваного фінансового та операційного життєвого циклу:

$$LCOE = \frac{CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5.14)$$

де  $CF_0$  – початкові інвестиції (інвестиційні витрати) (CAPEX);

$S_t$  – операційні витрати за період  $t$  (OPEX);

$E_t$  – електрична енергія, вироблена за період  $t$ .

Операційні витрати  $S_t$  складаються з витрат на експлуатацію та технічне обслуговування ( $M_t$ ) та витрати на паливо ( $F_t$ ) за період  $t$ :

$$S_t = M_t + F_t \quad (5.15)$$

Тобто вирівняна вартість електроенергії – середня розрахункова собівартість виробництва електроенергії протягом усього життєвого циклу електростанції (включно з усіма можливими інвестиціями, витратами та доходами).

LCOE – це оцінка собівартості виробництва електроенергії, а не ціна

A profitability index of 1 means breakeven. Any value less than one indicates that the PV of the project is less than the initial investment. As the value of the profitability index increases, the financial attractiveness of the proposed project also increases.

Thus, the PI criterion has an advantage when choosing one project from a number of projects with approximately the same NPV but different amounts of required investment. In this case, the project that provides greater investment efficiency is more profitable. Therefore, this indicator allows you to rank projects with limited investment resources.

**Levelised cost of electricity (LCOE).** The levelised cost of electricity (LCOE) is the average revenue per unit of electricity generated (e.g. UAH/kW·h) required to recover the construction (CAPEX) and operation (OPEX) costs of a power plant over the expected financial and operational life cycle:

where  $CF_0$  is the initial investment (investment costs) (CAPEX);

$S_t$  – operating expenses in period  $t$  (OPEX);

$E_t$  – electricity generated in period  $t$ .

Operating costs  $S_t$  consist of operation and maintenance costs ( $M_t$ ) and fuel costs ( $F_t$ ) for period  $t$ :

In other words, the levelised cost of electricity is the average estimated cost of electricity generation over the entire life cycle of a power plant (including all possible investments, expenses and revenues).

LCOE is an estimate of the cost of electricity generation, not the price of electricity.

електроенергії. На ціну електроенергії можуть впливати додаткові фактори, включаючи націнку та контроль за цінами.

LCOE зазвичай використовується для прийняття рішень щодо:

- техніко-економічного обґрунтування нових проєктів з виробництва електроенергії;
- інвестиційних стратегій, розроблених бізнесом або урядом.
- енергетичної політики, яка проводиться урядом.

LCOE дуже корисний для порівняння енергетичних технологій із різними експлуатаційними характеристиками (сонячна, вітрова, вкопна, ядерна тощо) [24].

LCOE рекомендується використовувати при оцінці альтернативних варіантів в умовах обмеженого бюджету, щоб досягти належного ранжування альтернатив, які потім можуть бути обрані до тих пір, поки бюджет не буде вичерпаний.

### 5.3.3 Імовірнісний підхід

Фінансовий аналіз зазвичай базується на вхідних даних, які не можна точно визначити, таких як вартість електроенергії, витрати на робочу силу або погодні умови. У випадку інвестицій в енергоефективність ця невизначеність лише збільшується через тривалий термін реалізації проєкту. Іншою групою важливих вхідних даних, що вносять невизначеність, є геометричні та теплові властивості житлового фонду, а також ефективність або якість енергетичних систем; ці дані зазвичай представлені середніми значеннями [26].

Можливим вирішенням проблеми невизначеності є використання комп'ютерних симуляцій, призначених для аналізу та тестування варіантів інвестиційних рішень. Одним із найбільш часто використовуваних методів моделювання є аналіз **методом Монте-Карло**. Аналіз починається з формування набору можливих значень вхідних даних для оцінки і на виході дає набір можливих значень фінансових показників, кожен з яких пов'язаний із відповідною ймовірністю його реалізації.

Приклад застосування методу Монте-Карло до чистої поточної вартості (NPV) проєкту представлений на рисунку 5.4, який показує, як значення NPV змінюються в

The price of electricity may be affected by additional factors, including mark-ups and price controls.

LCOE is commonly used to make decisions on:

- feasibility studies for new electricity generation projects;
- investment strategies developed by businesses or governments.
- energy policies implemented by the government.

LCOE is very useful for comparing energy technologies with different performance characteristics (solar, wind, fossil, nuclear, etc.) [24].

It is recommended to use LCOE when evaluating alternatives under a limited budget to achieve a proper ranking of alternatives, which can then be selected until the budget is exhausted.

### 5.3.3 Probabilistic approach

Financial analysis is usually based on inputs that cannot be precisely determined, such as electricity costs, labour costs, or weather conditions. In the case of energy efficiency investments, this uncertainty is only increased due to the long project implementation period. Another group of important inputs that introduce uncertainty are the geometric and thermal properties of the building stock, as well as the efficiency or quality of energy systems; these are usually represented by average values [26].

A possible solution to the problem of uncertainty is the use of computer simulations designed to analyse and test investment decision options. One of the most commonly used modelling methods is **Monte Carlo analysis**. The analysis begins with the formation of a set of possible values of the input data for evaluation and results in a set of possible values of financial indicators, each of which is associated with a corresponding probability of its realisation.

An example of applying the Monte Carlo method to the net present value (NPV) of a project is shown in figure 5.4, which shows how NPV values change depending on the projected

залежності від прогнозованого терміну життя проекту [26]. Графік також пояснює, що проект тривалістю 20 років, який починається у 2020 році, має 10 % ймовірності від'ємного значення NPV, що представлено червоною областю під частотним розподілом NPV (дзвоноподібна крива), що означає ризик збитків з імовірністю 10 %.

#### **5.3.4 Приклад інвестиційної оцінки проекту енергоефективності**

Розглянемо умовний енергоефективний проект з інвестиційними витратами 90 000 євро на теплоізоляцію, реконструкцію котельні та встановлення сонячних панелей на даху реконструйованих будівель [28]. Цей проект генерує щорічну економію енергії у розмірі 6 000 євро на опаленні порівняно з ситуацією до реконструкції, а також має щорічні доходи від продажу енергії (наприклад, за «зеленим» тарифом) у розмірі 4 000 євро. Річні операційні та інші витрати разом складають 3 200 євро. Очікуваний термін реалізації проекту – 20 років. Ставка дисконтування становить 3 %, що є дуже низьким рівнем, який може бути прийнятним лише для державного сектору.

Розрахунок виконано з використанням «Калькулятора фінансування проектів з енергоефективності» [29].

Вихідні дані представлено в табл. 5.1.

Результати розрахунку представлено в табл. 5.2.

Графічне відображення отриманих результатів представлено на рисунку 5.5.

Оскільки NPV перевищує 0 євро, проект доцільно впроваджувати, а IRR є досить низьким, але все ще прийнятним для державного сектору. Простий термін окупності на 6 років коротший за період життєвого циклу інвестицій, а при ставці дисконтування 3 % термін окупності лише на два роки коротший за період життєвого циклу інвестицій.

life of the project [26]. The graph also explains that a 20-year project that starts in 2020 has a 10 % probability of a negative NPV, represented by the red area under the NPV frequency distribution (bell-shaped curve), which means a 10 % risk of loss.

#### **5.3.4 Example of an investment valuation of an energy efficiency project**

Let us consider a hypothetical energy efficiency project with an investment cost of 90 000 EUR for heat insulation, boiler room renovation, and installation of solar panels on the roof of the reconstructed buildings [28]. This project generates annual energy savings of 6 000 EUR in heating costs compared to the pre-renovation situation, and has annual revenues from energy sales (FIT for instance) of 4 000 EUR. The annual operating and other costs combined are 3 200 EUR. The expected life of the project is 20 years. The discount rate is 3 %, which is a very low level that can only be tenable for the public sector.

The calculation was made using the Energy Efficiency Financing Project Calculator [29].

The initial data are presented in Table 5.1.

The calculation results are presented in Table 5.2.

A graphical representation of the results is shown in figure 5.5.

Since the NPV is greater than 0 EUR, the project is feasible and the IRR is quite low, but still acceptable for the public sector. The simple payback period is 6 years shorter than the investment life cycle, and with a discount rate of 3 %, the payback period is only two years shorter than the investment life cycle.

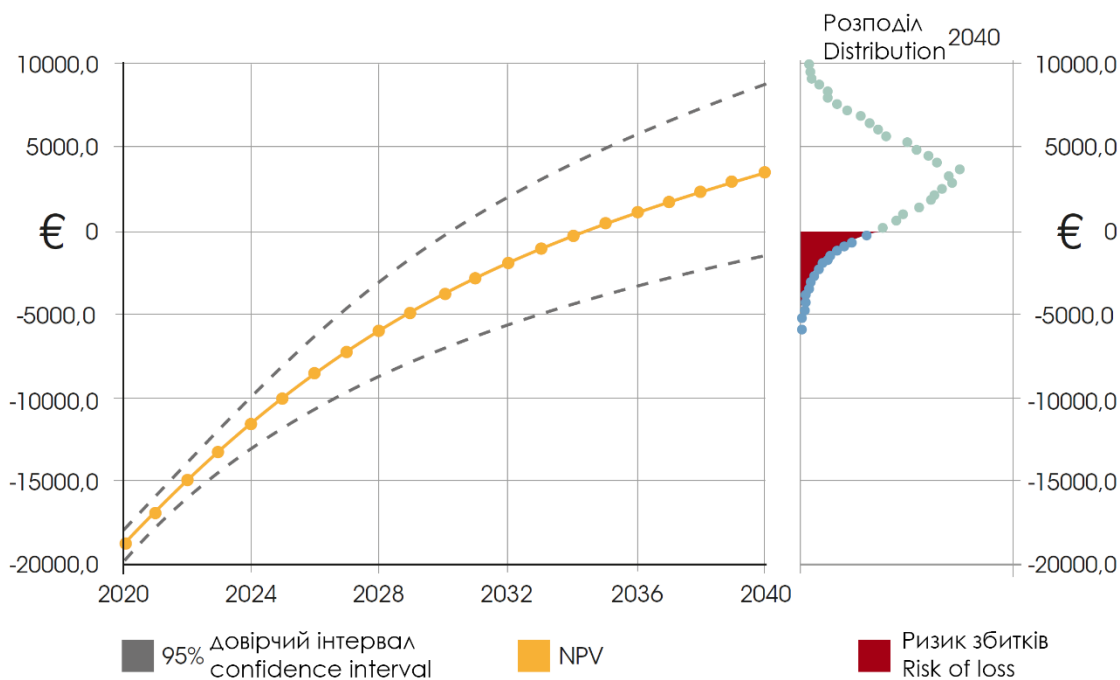


Рисунок 5.4 – Використання методу Монте-Карло для визначення зміни NPV в залежності від прогнозованого терміну життя проєкту [26]

Figure 5.4 – Using the Monte Carlo method to determine the change in NPV depending on the predicted life expectancy of the project [26]

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку проєкту енергоефективності  
Table 5.1 – Inputs to the energy efficiency project calculation

Вихідні дані / Input	Значення / Value
Капітальні витрати / Capital costs	90 000 євро / 90 000 EUR
Річна економія енергії / Annual energy savings	6 000 євро / 6 000 EUR
Річний дохід / Annual revenues	4 000 євро / 4 000 EUR
Річні операційні витрати / Annual operational costs	3 000 євро / 3 000 EUR
Інші витрати за рік / Other costs per year	200 євро / 200 EUR
Ставка дисконту / Discount rate	3 %
Життєвий період інвестицій / Investment lifetime period	20 років / 20 years

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку проєкту енергоефективності  
Table 5.2 – Results of the energy efficiency project calculation

Показник / Indicator	Значення / Value
Чиста поточна вартість NPV (20 років) Net present value NPV (20 years)	11 167 євро 11 167 EUR
Внутрішня норма рентабельності IRR Internal rate ratio IRR	1,26 % 1,26 %
Простий термін окупності Simple payback period	14 років 14 years
Дисконтований термін окупності Discounted payback period	18 років 18 years

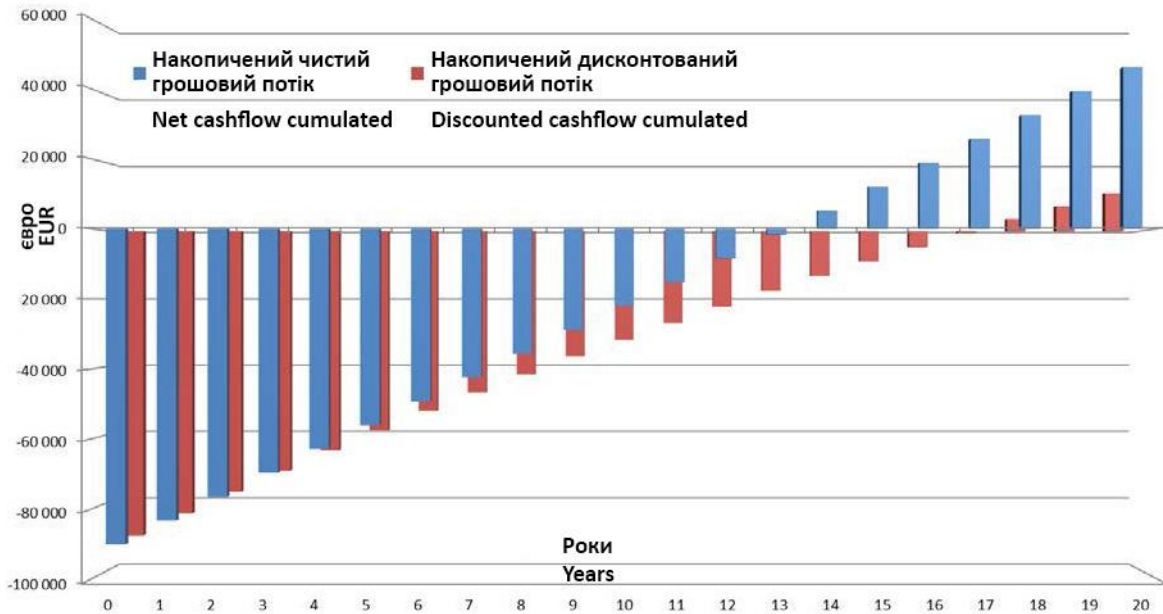


Рисунок 5.5 – Результати інвестиційної оцінки проєкту енергоефективності [28]

Figure 5.5 – Results of the investment assessment of the energy efficiency project [28]

У даному розрахунку беруться до уваги лише власні джерела фінансування, і не враховуються, наприклад, гранти та субсидії з одного боку або кредити з іншого боку, які можуть суттєво змінити прогнозовані значення. Якщо залучаються гранти та субсидії, то NPV та IRR зростають, а терміни окупності скорочуються. З іншого боку, кредити впливають на інвестиції протилежним чином, тобто коли ви співфінансуєте інвестиційний проєкт за рахунок кредиту, то NPV та IRR зменшуються, а терміни окупності збільшуються.

This calculation considers only own sources of financing and does not take into account, for example, grants and subsidies on the one hand or loans on the other hand, which can significantly change the projected values. If grants and subsidies are involved, the NPV and IRR increase and the payback periods decrease. On the other hand, loans have the opposite effect on investments, i.e. when you co-finance an investment project with a loan, the NPV and IRR decrease and the payback periods extend.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. М 02070915-737:2014  
Методика з проведення енергетичного аудиту бітумних баз та асфальтобетонних заводів з використанням тепловізійного обладнання
2. ДСТУ 4714:2007  
Енергозбереження. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу
3. ДСТУ 4110-2002  
Енергоощадність. Методика аналізу та розраховування питомих витрат енергоресурсів (ANSI/IEEE 739:1995, NEQ)
4. Wang C. et al. 2024.  
Construction of Energy Consumption Model in Asphalt Mixture Production Stage Based on Field Measurements. Buildings 14 (3303).  
<https://doi.org/10.3390/buildings14103303>
5. Woodrow J.H. 1981. Energy Involved in Construction Materials and Procedures. National Cooperative Highway Research Program (85). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
6. Our World in Data:  
<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>
7. Umweltbundesamt 2022,  
Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.
8. ДСТУ Б В.2.7-319:2016  
Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань
9. National Asphalt Pavement Association. 2023. Quality Improvement Series 132: Production Strategies for Saving Money and Reducing Emissions. Published 08/2023.  
<https://member.asphaltpavement.org/Shop/Product-Catalog/Product-Details?productid={C2DFA1BC-C53D-EE11-BDF4-6045BDDA475B}>
10. Simmons, G. H. No date. Stockpiles. Technical Paper T-128.  
<http://www.astecinc.com/>
11. Stamper, G., R. L. Koral, C. Strock. 1979. Handbook of Air Conditioning Heating and Ventilating. Space Heating. 3rd ed. United States of America: Sixth Printing.

## REFERENCES

1. М 02070915-737:2014  
Methodology for conducting energy audit of bitumen bases and asphalt concrete plants using thermal imaging equipment
2. DSTU 4714:2007  
Energy saving. Fuel and energy balances of industrial enterprises. Methods of construction and analysis
3. DSTU 4110-2002  
Energy saving. Methodology for analysing and calculating specific energy consumption (ANSI/IEEE 739:1995, NEQ)
4. Wang C. et al. 2024.  
Construction of Energy Consumption Model in Asphalt Mixture Production Stage Based on Field Measurements. Buildings 14 (3303).  
<https://doi.org/10.3390/buildings14103303>
5. Woodrow J.H. 1981. Energy Involved in Construction Materials and Procedures. National Cooperative Highway Research Program (85). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
6. Our World in Data:  
<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>
7. Umweltbundesamt 2022,  
Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.
8. DSTU B В.2.7-319: 2016  
Asphalt concrete mixtures and asphalt concrete for road and airfield. Test methods
9. National Asphalt Pavement Association. 2023. Quality Improvement Series 132: Production Strategies for Saving Money and Reducing Emissions. Published 08/2023.  
<https://member.asphaltpavement.org/Shop/Product-Catalog/Product-Details?productid={C2DFA1BC-C53D-EE11-BDF4-6045BDDA475B}>
10. Simmons, G. H. No date. Stockpiles. Technical Paper T-128.  
<http://www.astecinc.com/>
11. Stamper, G., R. L. Koral, C. Strock. 1979. Handbook of Air Conditioning Heating and Ventilating. Space Heating. 3rd ed. United States of America: Sixth Printing.

12. Ang, B. W., T. F. Fwa, T. T. Ng. 1993. "Analysis of Process Energy Use of Asphalt-Mixing Plants." *Energy*, 18 (7), pp.769-777.

13. Process Heating Company. 2023.

<https://www.processheating.com/industries/asphalt/>

14. Roseboom, H.A. 2017. Reduction of Energy Use at Asfaltcentrale Twente (original title: Vermindering van energiegebruik bij Asfaltcentrale Twente). Twente University, Enschede, The Netherlands.

15. Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22272>.

16. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2014. Field

17. Braham, Andrew. 2021. Overview of Warm Mix Asphalt – 2021 Update. University of Arkansas. <https://www.youtube.com/watch?v=BvXZhbTpefU&t=0s>

18. MWV Specialty Chemicals. 2013. Introduction to Warm Mix Asphalt Technology. <https://www.youtube.com/watch?v=ZEE6RP2AOrY>

19. <https://epa.org/warm-mix-asphalt/>

20. ДСТУ 9281:2024 Бітумомінеральні суміші. Національні вимоги до асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-1

21. ДСТУ EN 13108-8:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 8. Регенований асфальтобетон (EN 13108-8:2016, IDT)

22. R. Izaksa, V. Haritonovsb, I. Klasac, M. Zaumanisd Hot Mix Asphalt With High RAP Content. *Procedia Engineering*. Vol. 114. 2015. Pp. 676-684.

23. <https://www.fhwa.dot.gov/pave/ment/recycling/rap/>

24. Luca A. Tagliafico. Investment evaluation. University of Genoa. ERASMUS+ CBHE «UKRENERGY» – Genoa intensive course. 13th Jan. – 7th Feb. 2025.

25. Level of Management: <https://www.ezilearning.com/level-of-management.html>

26. Valuation of energy efficiency measures for on-bill schemes. BPIE (Buildings

12. Ang, B. W., T. F. Fwa, T. T. Ng. 1993. "Analysis of Process Energy Use of Asphalt-Mixing Plants." *Energy*, 18 (7), pp.769-777.

13. Process Heating Company. 2023.

<https://www.processheating.com/industries/asphalt/>

14. Roseboom, H.A. 2017. Reduction of Energy Use at Asfaltcentrale Twente (original title: Vermindering van energiegebruik bij Asfaltcentrale Twente). Twente University, Enschede, The Netherlands.

15. Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22272>.

16. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2014. Field

17. Braham, Andrew. 2021. Overview of Warm Mix Asphalt – 2021 Update. University of Arkansas. <https://www.youtube.com/watch?v=BvXZhbTpefU&t=0s>

18. MWV Specialty Chemicals. 2013. Introduction to Warm Mix Asphalt Technology. <https://www.youtube.com/watch?v=ZEE6RP2AOrY>

19. <https://epa.org/warm-mix-asphalt/>

20. DSTU 9281:2024 Bitumen-mineral mixtures. National requirements for asphalt mixtures in accordance with DSTU EN 13108-1

21. DSTU EN 13108-8: 2018 Bituminous mineral mixtures. Technical specifications. Part 8: Recycled asphalt concrete (EN 13108-8:2016, IDT)

22. R. Izaksa, V. Haritonovsb, I. Klasac, M. Zaumanisd Hot Mix Asphalt With High RAP Content. *Procedia Engineering*. Vol. 114. 2015. Pp. 676-684.

23. <https://www.fhwa.dot.gov/pave/ment/recycling/rap/>

24. Luca A. Tagliafico. Investment evaluation. University of Genoa. ERASMUS+ CBHE «UKRENERGY» – Genoa intensive course. 13th Jan. – 7th Feb. 2025.

25. Level of Management: <https://www.ezilearning.com/level-of-management.html>

26. Valuation of energy efficiency measures for on-bill schemes. BPIE (Buildings

Performance Institute Europe), 2022: <https://www.bpie.eu/publication/valuation-of-energy-efficiency-measures-for-on-bill-schemes/>

27. Грошовий потік. wikipedia.org: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%BE%D1%88%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BA#cite\\_note-1](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%BE%D1%88%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BA#cite_note-1)

28. OnePlace web platform of BOOSTEE-CE/TARGET-CE project. Example of using the online calculator: <https://oneplace.fbk.eu/assets/Uploads/c13dba709a/How-to-use-EE-calculator.pdf>

29. OnePlace web platform of BOOSTEE-CE/TARGET-CE project. Energy efficiency financing project calculator: <https://oneplace.fbk.eu/financing-energy-efficiency/financing-energy-efficiency/energy-efficiency-financing-project-calculator/>

Performance Institute Europe), 2022: <https://www.bpie.eu/publication/valuation-of-energy-efficiency-measures-for-on-bill-schemes/>

27. Cash flows. wikipedia.org: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%BE%D1%88%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BA#cite\\_note-1](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%BE%D1%88%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BA#cite_note-1)

28. OnePlace web platform of BOOSTEE-CE/TARGET-CE project. Example of using the online calculator: <https://oneplace.fbk.eu/assets/Uploads/c13dba709a/How-to-use-EE-calculator.pdf>

29. OnePlace web platform of BOOSTEE-CE/TARGET-CE project. Energy efficiency financing project calculator: <https://oneplace.fbk.eu/financing-energy-efficiency/financing-energy-efficiency/energy-efficiency-financing-project-calculator/>

## ДОДАТОК 1. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

### 1.1 Розрахунок енергоспоживання виробництва асфальтобетонної суміші

**Задача:** розрахувати енергоспоживання різних типів асфальтобетонних сумішей та порівняти результати.

#### Вхідні дані:

- суміш 1: асфальтобетонна суміш гаряча АС-25, температура розігріву  $T_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- суміш 2: асфальтобетонна суміш тепла АС-25, температура розігріву  $T_2 = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- асфальтобетонний завод: КДМ209 (додатки 2, 3);
- сезон виробництва асфальтобетону: осінь;
- маса суміші:  $m = 1$  тонна.

#### Розрахунки

Наступні розрахунки виконуються відповідно до розділу 2.2, рівняння (2.5)-(2.8).

Розраховуємо витрати енергії на виробництво 1 тонни гарячої асфальтобетонної суміші марки АС-25. Розрахунки для теплої асфальтобетонної суміші АС-25 є ідентичними, тому для неї наведено тільки кінцеві результати.

*1.1.1 Етап видалення пилу із заповнювача*

$a_1 = 3,375$  для осені;  $k_{11} = 1,05$  для мідних і алюмінієвих дротів;  $k_{12} = 1,0$ ;  $k_{13} = 0,85$ ;  $N_1 = 140$  кВт;  $t_1 = 0,025$  год.

$$E_1 = 3,375 \cdot \frac{1,05 \cdot 1,0 \cdot 140}{0,85} \cdot 0,025 = 14,6 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

*1.1.2 Етап висушування заповнювача*

$a_2 = 1,087$ ;  $m_2 = 920$  кг;  $w = 5\%$ ;  $c_1 = 2,472 \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C);  $c_2 = 1,162 \cdot 10^{-3}$  (кВт·год)/(кг·°C);  $c_3 = 5,083 \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C);  $T_{21} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{22} = 175\text{ }^\circ\text{C}$  (гаряча суміш),  $T_{22} = 130\text{ }^\circ\text{C}$  (тепла суміш);  $k_{21} = 1,03$ ;  $k_{22} = 1,0$ ;  $N_2 = 140$  кВт;  $G_2 = 0,270$  кг/(кВт·год) для дизельних двигунів;  $NCV_2 = 12,6$  (кВт·год)/кг, оскільки на цій стадії використовується дизельна енергія;  $t_2 = 0,025$  год.

## APPENDIX 1. EXAMPLE CALCULATION

### 1.1 Calculation of energy consumption of asphalt mixture production

**Objective:** to calculate energy consumption of different asphalt mixture types and compare the results.

#### Input data:

- mixture 1: asphalt concrete AC-25 hot, temperature of asphalt heating  $T_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- mixture 2: asphalt concrete AC-25 warm, temperature of asphalt heating  $T_2 = 120\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- asphalt production plant: KDM209 (Appendices 2, 3);
- season of asphalt concrete production: autumn;
- mixture mass:  $m = 1$  tonne.

#### Calculations

The following calculations are performed according to section 2.2, equations (2.5)-(2.8).

Let us calculate energy consumption of production of 1 tonne of AC-25 hot asphalt concrete mixture. Calculations for AC-25 warm mix are identical, thus only end results are given.

*1.1.1 Aggregate dust removal phase*

$a_1 = 3,375$  for autumn;  $k_{11} = 1,05$  for copper and aluminium wires;  $k_{12} = 1,0$ ;  $k_{13} = 0,85$ ;  $N_1 = 140$  kW;  $t_1 = 0,025$  h.

*1.1.2 Aggregate drying phase*

$a_2 = 1,087$ ;  $m_2 = 920$  kg;  $w = 5\%$ ;  $c_1 = 2,472 \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C);  $c_2 = 1,162 \cdot 10^{-3}$  (kW·h)/(kg·°C);  $c_3 = 5,083 \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C);  $T_{21} = 15\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{22} = 175\text{ }^\circ\text{C}$  (hot mixture),  $T_{22} = 130\text{ }^\circ\text{C}$  (warm mixture);  $k_{21} = 1,03$ ;  $k_{22} = 1,0$ ;  $N_2 = 140$  kW;  $G_2 = 0,270$  kg/(kW·h) for diesel engines;  $NCV_2 = 12,6$  (kW·h)/kg with this stage being diesel energy;  $t_2 = 0,025$  h.

$$E_2 = 1,087 \cdot \left[ 920 \cdot \left( 1 - \frac{5}{100} \right) \cdot (175 - 15) \cdot 2,472 \cdot 10^{-4} + 920 \cdot \frac{5}{100} \cdot (100 - 15) \cdot 1,162 \cdot 10^{-3} + 920 \cdot \frac{5}{100} \cdot (175 - 100) \cdot 5,083 \cdot 10^{-4} + 1,03 \cdot 1,0 \cdot 140 \cdot 0,27 \cdot 12,6 \cdot 0,025 \right] = 57,8 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

### 1.1.3 Етап підігріву бітуму

$a_3 = 8,129$  для звичайного немодифікованого асфальтобетону;  $m_3 = 42$  кг (решта 38 кг – мінеральний порошок);  $T_{32} = 145 \cdot ^\circ\text{C}$  (гаряча суміш),  $T_{31} = 15 \cdot ^\circ\text{C}$  (тепла суміш);  $c_4 = 2,778 \cdot 10^{-4}$  (кВт·год)/(кг·°C);  $k_{31} = 1,03$ ;  $k_{32} = 1,0$ ;  $N_3 = 140$  кВт;  $G_3 = 0,200$  кг/(кВт·год) для газового пальника;  $NCV_3 = 10,6$  (кВт·год)/кг для природного газу;  $t_3 = 0,083$  год.

### 1.1.3 Asphalt heating phase

$a_3 = 8,129$  for base asphalt;  $m_3 = 42$  kg (the remaining 38 kg is mineral powder);  $T_{32} = 145 \cdot ^\circ\text{C}$  (hot mixture),  $T_{31} = 15 \cdot ^\circ\text{C}$  (warm mixture);  $c_4 = 2,778 \cdot 10^{-4}$  (kW·h)/(kg·°C);  $k_{31} = 1,03$ ;  $k_{32} = 1,0$ ;  $N_3 = 140$  kW;  $G_3 = 0,200$  kg/(kW·h) for gas burner;  $NCV_3 = 10,6$  (kW·h)/kg, which at this stage is natural gas;  $t_3 = 0,083$  h.

$$E_3 = 8,129 \cdot (42 \cdot (145 - 15) \cdot 2,778 \cdot 10^{-4} + 1,03 \cdot 1,0 \cdot 140 \cdot 0,200 \cdot 10,6 \cdot 0,083) = 218,6 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

### 1.1.4 Етап змішування суміші

$a_4 = 3,306$ ;  $k_{41} = 1,05$  для мідних та алюмінієвих дротів;  $k_{42} = 1,0$ ;  $k_{43} = 0,85$ ;  $N_4 = 140$  кВт;  $t_4 = 0,013$  год.

### 1.1.4 Mixture blending phase

$a_4 = 3,306$ ;  $k_{41} = 1,05$  for copper and aluminium wires;  $k_{42} = 1,0$ ;  $k_{43} = 0,85$ ;  $N_4 = 140$  kW;  $t_4 = 0,013$  h.

$$E_4 = 3,306 \cdot \frac{1,05 \cdot 1,0 \cdot 140}{0,85} \cdot 0,013 = 7,4 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

### 1.1.5 Загальне споживання енергії під час виробництва суміші

Для гарячої асфальтобетонної суміші:

### 1.1.5 Total energy consumption during mixture production

For hot asphalt mixture:

$$E_h = \sum_{i=1}^4 E_i = 14,6 + 57,8 + 218,6 + 7,4 = 298,4 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Для теплої асфальтобетонної суміші:

For warm asphalt mixture:

$$E_w = \sum_{i=1}^4 E_i = 14,6 + 46,0 + 215,7 + 7,4 = 283,7 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Різниця:

Difference:

$$\Delta = \frac{E_h - E_w}{E_h} \cdot 100\% = \frac{298,4 - 283,7}{298,4} \cdot 100\% = 4,9 \%$$

Результати розрахунків представлені на рисунку 1.1.

Results of the calculations are presented in Figure 1.1.

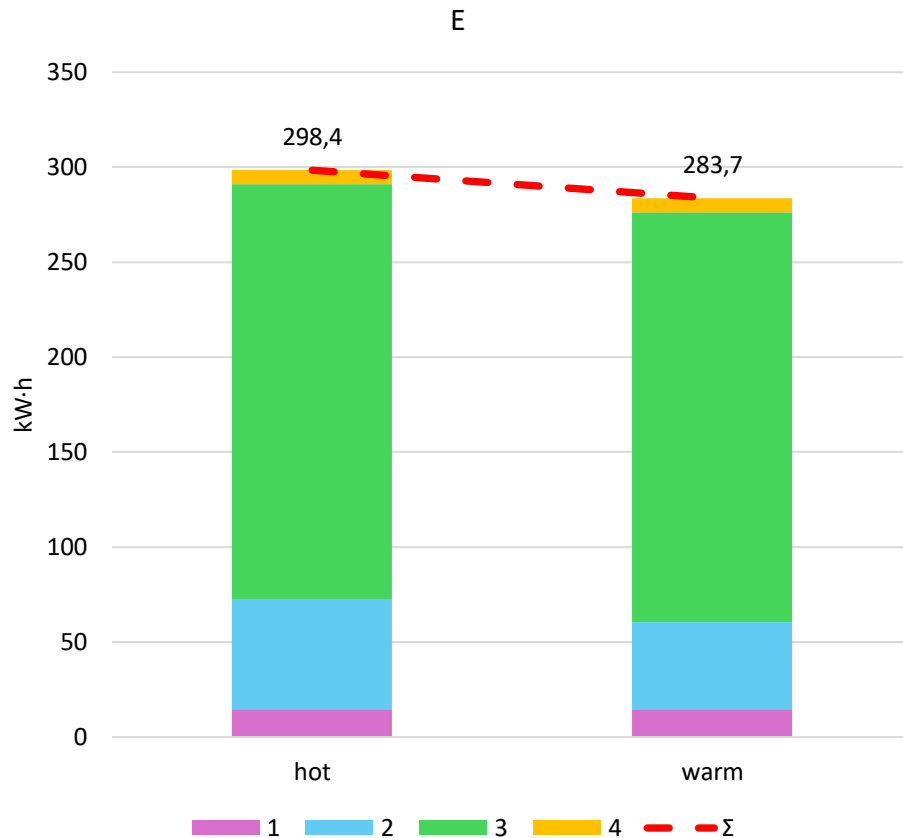


Рисунок 1.1 – Порівняння енергоспоживання під час виробництва 1 тонни гарячої та теплої асфальтобетонної суміші марки АС-25

Figure 1.1 – Comparison of energy consumption during production of 1 tonne of AC-25 hot and warm asphalt mixtures

### 1.2 Розрахунок викидів CO<sub>2</sub>

**Мета:** розрахувати вуглецевий слід виробництва різних асфальтобетонних сумішей.

**Вхідні дані:** Споживання енергії на кожному етапі виробництва суміші взято з розділу 2.5.1.

#### Розрахунки

Наступні розрахунки виконано відповідно до розділу 2.4, рівняння (2.23), відповідно до джерела енергії, яке використовується на кожному етапі виробництва асфальтобетонної суміші.

Розрахунки нижче наведені для гарячої суміші. Для теплої суміші представлені лише кінцеві результати, оскільки розрахунки ідентичні.

### 1.2 Calculation of CO<sub>2</sub> emissions

**Objective:** to calculate carbon footprint of production of different asphalt mixtures.

**Input data:** Energy consumption for each stage of mixture production is taken from section 2.5.1.

#### Calculations

The following calculations are performed according to section 2.4, equation (2.23), according to energy source used at every stage of asphalt mixture production.

Calculations below are given for the hot mixture. For warm mixture, only end results are presented as calculations are identical.

$$\begin{aligned}
 CE_1 &= E_1 \cdot CI_1 = 14,6 \cdot 0,260 = 3,796 \text{ kg CO}_2 \\
 CE_2 &= E_2 \cdot CI_2 = 57,8 \cdot 0,267 = 15,433 \text{ kg CO}_2 \\
 CE_3 &= E_3 \cdot CI_3 = 218,6 \cdot 0,201 = 43,939 \text{ kg CO}_2 \\
 CE_4 &= E_4 \cdot CI_4 = 7,4 \cdot 0,260 = 1,924 \text{ kg CO}_2
 \end{aligned}$$

$$CE_h = \sum_{i=1}^4 CE_i = 3,796 + 15,433 + 43,939 + 1,924 = 65,092 \text{ kg CO}_2$$

Для теплої асфальтобетонної суміші:

For warm asphalt mixture:

$$CE_w = \sum_{i=1}^4 CE_i = 3,796 + 12,282 + 43,356 + 1,924 = 61,358 \text{ kg CO}_2$$

Різниця:

Difference:

$$\Delta = \frac{CE_h - CE_w}{CE_h} \cdot 100\% = \frac{65,092 - 61,358}{65,092} \cdot 100\% = 5,7 \%$$

Результати розрахунків представлені на рисунку 1.2.

Results of the calculations are presented in Figure 1.2.

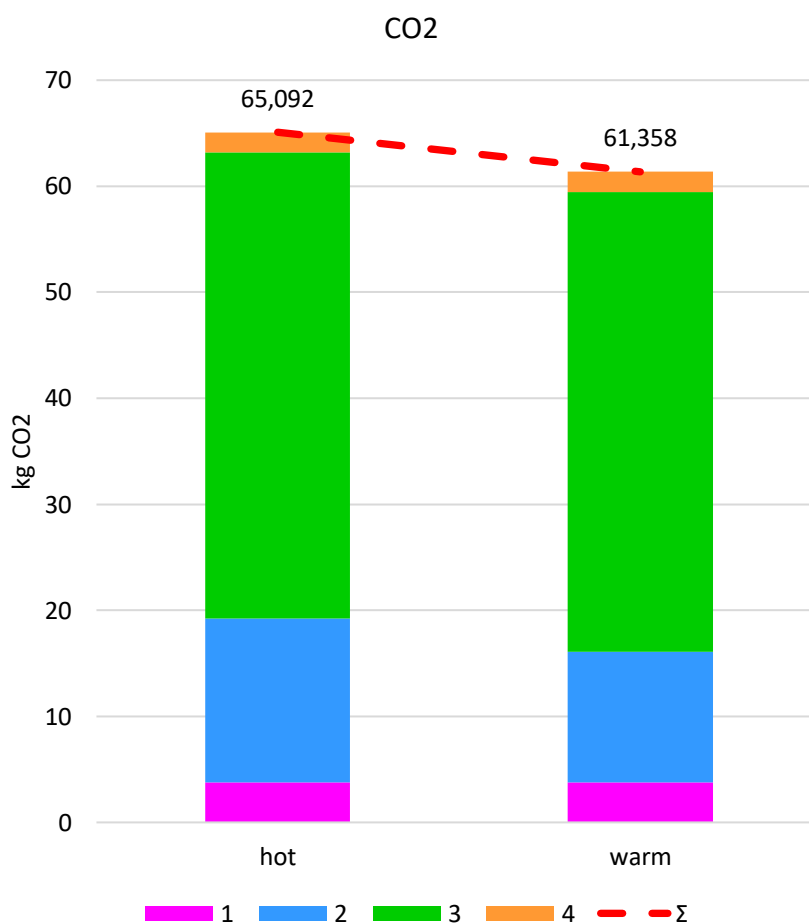


Рисунок 1.2 – Порівняння викидів CO<sub>2</sub> під час виробництва 1 тонни гарячої та теплої асфальтобетонної суміші АС-25

Figure 1.2 – Comparison of CO<sub>2</sub> emissions during production of 1 tonne of AC-25 hot and warm asphalt mixtures

Як показують результати розрахунків (рисунки 1.1-1.4), зниження температури приготування асфальтобетону на 30 градусів дозволяє зменшити споживання енергії на 5-30 % та викиди CO<sub>2</sub> щонайменше на 6 %. Однак це скорочення залежить від кількості асфальтобетонної суміші.

As shown by the calculation results (Figures 1.1-1.4), reducing the asphalt concrete preparation temperature by 30 degrees allows reducing energy consumption by 5-30 % and CO<sub>2</sub> emission by 6 % at least. However, this reduction depends on the amount of asphalt mix.

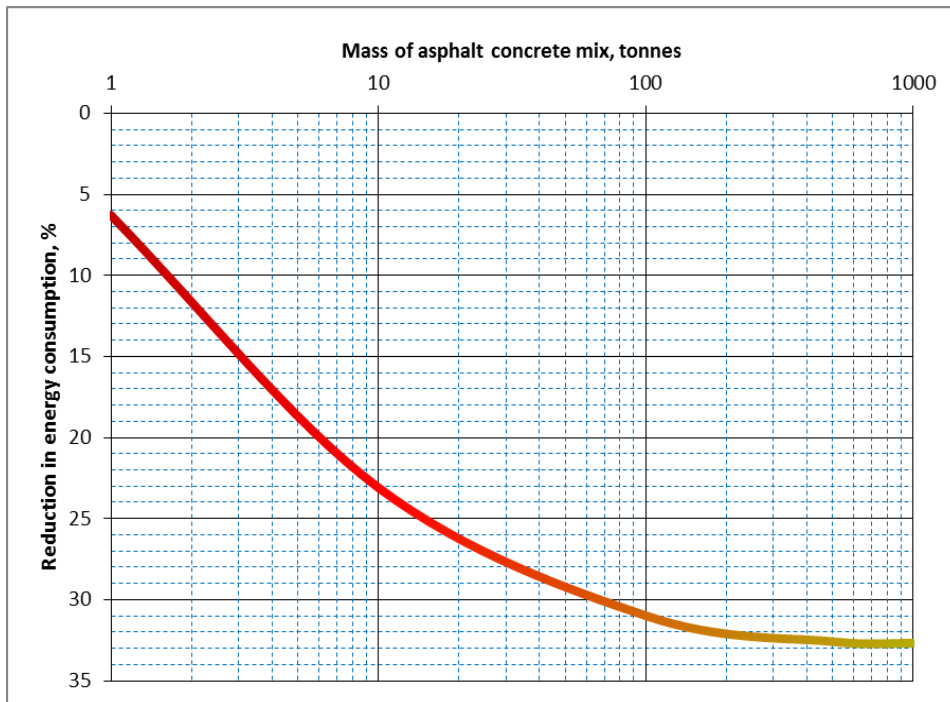


Рисунок 1.3 – Зменшення споживання енергії при зниженні температури виробництва асфальтобетонної суміші на 30 °C

Figure 1.3 – Reduction of energy consumption when the temperature of asphalt concrete mix production is reduced by 30 °C

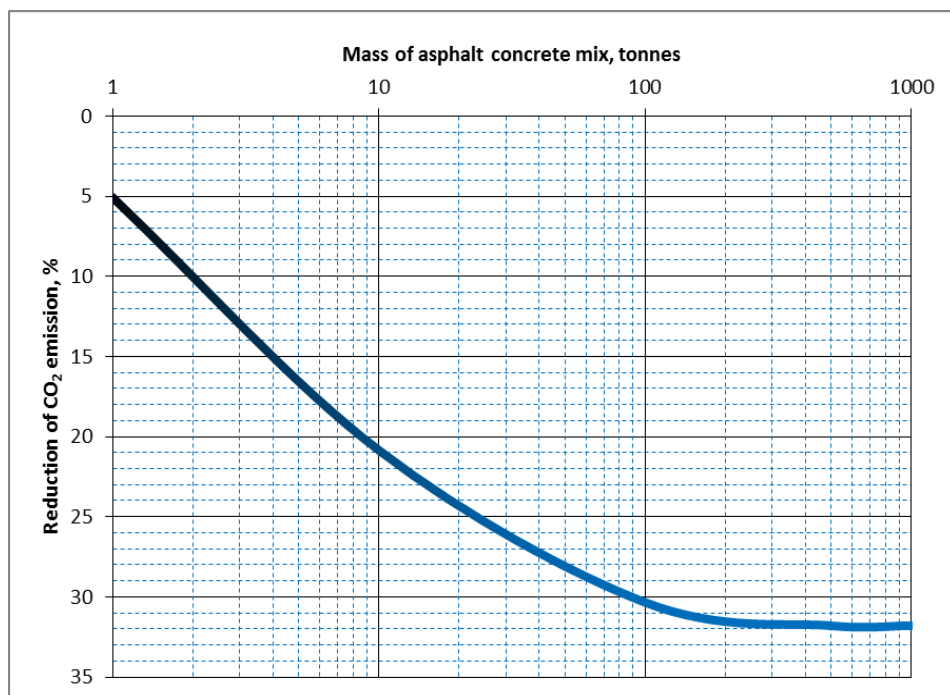


Рисунок 1.4 – Зменшення викидів CO<sub>2</sub> при зниженні температури виробництва асфальтобетонної суміші на 30 °C

Figure 1.4 – Reduction of CO<sub>2</sub> emission when the temperature of asphalt concrete mix production is reduced by 30 °C

**1.3 Розрахунок енергоспоживання на різних етапах будівництва дорожнього одягу**

**1.3 Calculation of energy consumption at different stages of pavement construction**

**Задача:** розрахувати енергоспоживання на різних етапах будівництва дорожнього покриття.

**Objective:** to calculate energy consumption at different stages of pavement construction.

**Вихідні дані:**

Коефіцієнт ущільнення основи дорожнього одягу  $CF_{base} = 170036 \text{ кг}/(\text{км}\cdot\text{см})$  або  $2323 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Вміст асфальту (бітуму) в суміші  $C_{asph} = 4,2 \%$ .

Теплота згоряння (калорійна енергія) дизельного палива  $CE_{diesel} = 38742,080 \text{ кДж}/\text{л}$ .

Теплота згоряння (калорійна енергія) асфальту  $CE_{asph} = 43147,300 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

**Розрахунки**

Наступні розрахунки виконано відповідно до розділу 2.3, рівняння (2.9)-(2.22).

*1.3.1 Будівельна енергія*

Питома енергія на видалення пилу та висушування заповнювача:

**Input data:**

Compaction factor for a base of road pavement  $CF_{base} = 170036 \text{ kg}/(\text{km}\cdot\text{cm})$  or  $2323 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Content of asphalt (bitumen) in a mixture  $C_{asph} = 4,2 \%$ .

Calorific energy of diesel  $CE_{diesel} = 38742,080 \text{ kJ}/\text{l}$ .

Calorific energy of asphalt  $CE_{asph} = 43147,300 \text{ kJ}/\text{kg}$ .

**Calculations**

The following calculations are performed according to section 2.3, equations (2.9)-(2.22).

*1.3.1 Construction energy*

Specific energy for dust removal and drying of aggregate:

$$SE_{dust\_dry\_aggr} = \frac{14,6 + 57,8}{1000 \cdot 12,6 \cdot 0,84} = 0,007 \text{ l}/\text{kg}$$

Енергія на видалення пилу та висушування заповнювача:

Energy for dust removal and drying of aggregate:

$$E_{c\_dust\_dry\_aggr} = 170036 \cdot \left(1 - \frac{4,2}{100}\right) \cdot 0,007 = 1114,282 \text{ l}/(\text{км} \cdot \text{см})$$

Питома енергія на нагрівання та змішування асфальту:

Specific energy for heating and mixing of asphalt:

$$SE_{heat\_mix} = \frac{218,6 + 7,4}{1000} \cdot 3600 = 813,6 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Енергія на нагрівання та змішування асфальту:

Energy for heating and mixing of asphalt:

$$E_{c\_mix} = \frac{170036 \cdot 813,6}{38742,080} = 3570,828 \text{ l}/(\text{км} \cdot \text{см})$$

Питома енергія на укладання та ущільнення суміші  $SE_{spr\_comp} = 19,422 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Specific energy for spreading and compacting of the mixture  $SE_{spr\_comp} = 19,422 \text{ kJ}/\text{kg}$ .

Енергія на укладання та ущільнення:

Energy for spreading and compacting:

$$E_{c\_spr\_comp} = \frac{170036 \cdot 19,422}{38742,080} = 85,242 \text{ l}/(\text{км} \cdot \text{см})$$

Загальна енергія будівництва:

Total construction energy:

$$E_{c\_total} = 1114,282 + 3570,828 + 85,242 = 4770,351 \text{ l}/(\text{км} \cdot \text{см})$$

*1.3.2 Транспортна енергія*

Відстань перевезення асфальту  $D_{asph} = 80 \text{ км}$ .

*1.3.2 Transport energy*

Transportation distance of asphalt  $D_{asph} =$

Витрата пального вантажівками під час перевезення асфальту $FU_{asph} = 0,0000472$ л/(кг·км).	Fuel use by trucks during asphalt hauling $FU_{asph} = 0,0000472$ l/(kg·km).
Енергія для транспортування асфальту:	Energy for asphalt transportation:

$$E_{tr\_asph} = 170036 \cdot \frac{4,2}{100} \cdot 80 \cdot 2 \cdot 0,0000472 = 53,933 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Відстань перевезення заповнювача $D_{aggr} = 16$ км.	Transportation distance of aggregate $D_{aggr} = 16$ km.
Витрата пального вантажівками під час перевезення заповнювача $FU_{aggr} = 0,0000472$ л/(кг·км).	Fuel use by trucks during aggregate hauling $FU_{aggr} = 0,0000472$ l/(kg·km).
Енергія для транспортування заповнювача:	Energy for aggregate transportation:

$$E_{tr\_aggr} = 170036 \cdot \left(1 - \frac{4,2}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{5}{100}\right) \cdot 16 \cdot 2 \cdot 0,0000472 = 258,338 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Відстань перевезення асфальтобетонної суміші $D_{mix} = 50$ км.	Transportation distance of asphalt mixture $D_{mix} = 50$ km.
Витрата пального вантажівками під час перевезення суміші $FU_{mix} = 0,0000742$ л/(кг·км).	Fuel use by trucks during mixture hauling $FU_{mix} = 0,0000742$ l/(kg·km).
Енергія для транспортування асфальтобетонної суміші:	Energy for mixture transportation:

$$E_{tr\_mix} = 170036 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 0,0000742 = 1261,667 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Загальна транспортна енергія:	Total transport energy:
-------------------------------	-------------------------

$$E_{tr\_total} = 53,933 + 258,338 + 1261,667 = 1573,938 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

<i>1.3.3 Енергія переробки</i>	<i>1.3.3 Processing energy</i>
Питома енергія переробки заповнювача $PE_{aggr} = 67,570$ кДж/кг.	Specific processing energy of aggregate $PE_{aggr} = 67,570$ kJ/kg.
Енергія переробки заповнювача:	Processing energy for aggregate:

$$E_{pr\_aggr} = 170036 \cdot \left(1 - \frac{4,2}{100}\right) \cdot \frac{67,570}{38742,080} = 284,104 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Питома енергія переробки асфальту (бітуму) $PE_{asph} = 682,681$ кДж/кг.	Specific processing energy of asphalt $PE_{asph} = 682,681$ kJ/kg.
Енергія переробки асфальту:	Processing energy for asphalt:

$$E_{pr\_asph} = 170036 \cdot \frac{4,2}{100} \cdot \frac{682,681}{38742,080} = 125,842 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Загальна енергія переробки:	Total processing energy:
-----------------------------	--------------------------

$$E_{pt\_total} = 284,104 + 125,842 = 409,946 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

1.3.4 *Теплота згорання (калорійна енергія)*

1.3.4 *Calorific energy*

Калорійна енергія асфальту (бітуму):

Calorific energy of asphalt:

$$E_{cal\_asph} = 170036 \cdot \frac{4,2}{100} \cdot \frac{43147,300}{38742,080} = 7953,547 \text{ l/(km} \cdot \text{cm)}$$

Споживання енергії під час будівництва асфальтобетонного покриття показано на рис. 1.5.

Energy consumption during construction of asphalt concrete pavement is shown in Figure 1.5.

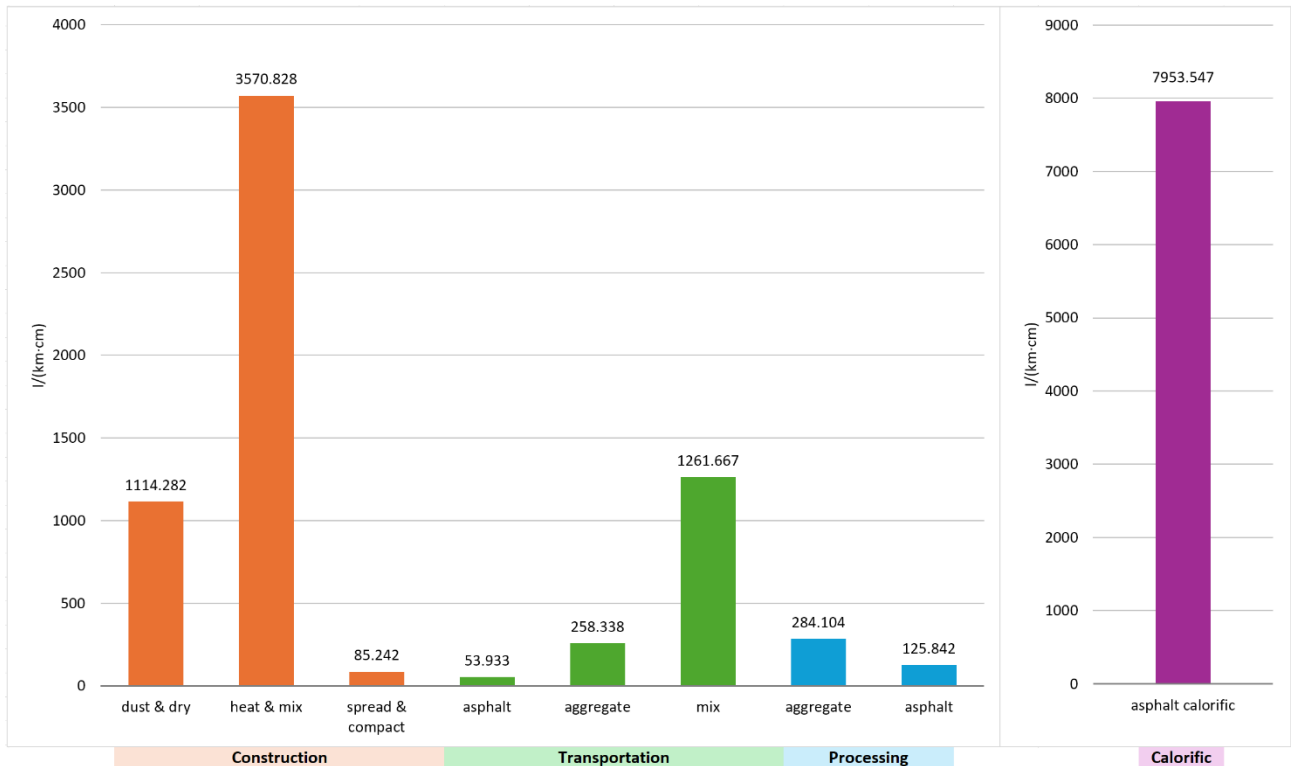
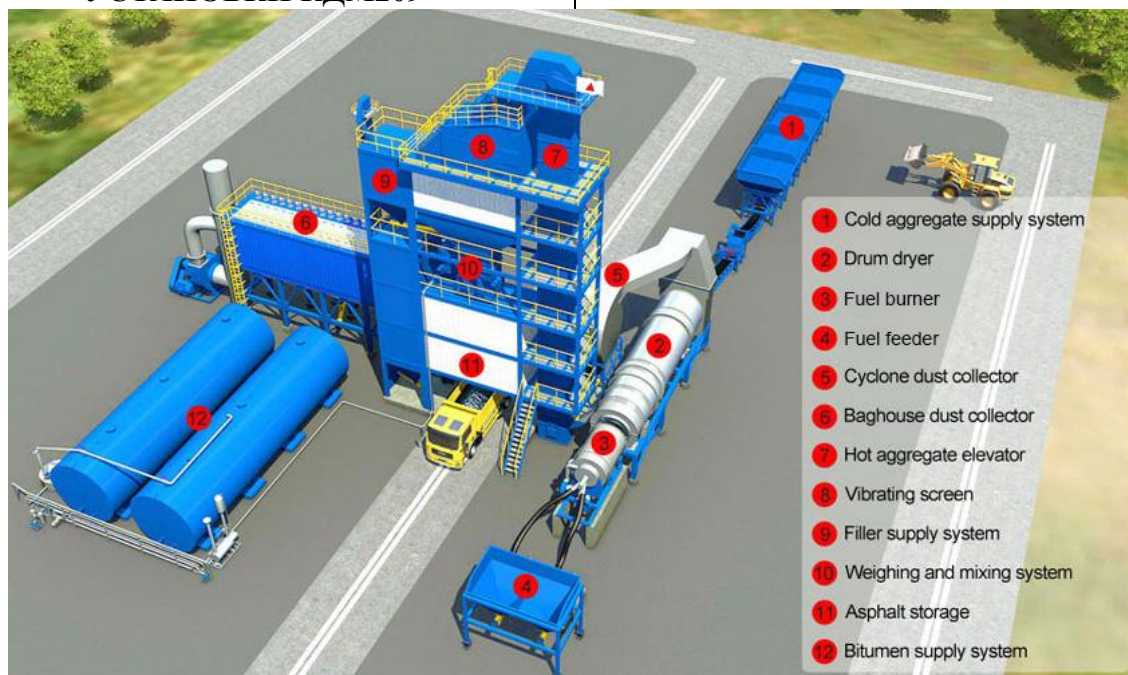


Рисунок 1.5 – Споживання енергії, л/(км·см), під час будівництва асфальтобетонного покриття

Figure 1.5 – Energy consumption, l/(km·cm), during construction of asphalt concrete pavement

**ДОДАТОК 2. КОМПОНЕНТИ  
АСФАЛЬТОЗМІШУВАЛЬНОЇ  
УСТАНОВКИ КДМ209**

**APPENDIX 2. COMPONENTS OF THE  
ASPHALT MIXING PLANT KDM209**



**ДОДАТОК 3. ТЕХНІЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АСФАЛЬТОЗМІШУВАЛЬНОЇ  
УСТАНОВКИ КДМ209**

**APPENDIX 3. TECHNICAL  
SPECIFICATIONS OF THE ASPHALT  
MIXING PLANT KDM209**

Параметр / Parameter	Значення / Value
Номінальна продуктивність при вологості матеріалів (піску і щебеню) до 3%, т/год Nominal productivity at a moisture content of materials (sand and crushed stone) up to 3%, t/h	110
Установлена потужність, кВт, не більше Installed power, kW, no more	280
Місткість бункерів системи подачі, шт. · м <sup>3</sup> Capacity of the supply system hoppers, pcs. · m <sup>3</sup>	5 · 12 = 60
Ширина конвеєрної стрічки, мм Conveyor belt width, mm	500
Сушильний барабан, Ø · L, мм Drying drum, Ø · L, mm	1780 · 7900
Потужність пальника, МВт Burner power, MW	9
Тип палива Fuel type	рідке або газоподібне liquid or gaseous
Тип сита Sieve type	інерційне, самобалансуюче з двома електричними вібраторами inertial, self-balancing with two electric vibrators
Кількість фракцій кам'яного матеріалу, шт. Number of aggregate fractions, pcs.	5
Ємність бункера гарячого заповнювача, м <sup>3</sup> Hot aggregate hopper capacity, m <sup>3</sup>	17
Максимальна маса суміші, кг	1500

Maximum mass of the mixture, kg	
Місткість бункера асфальтобетонної суміші, м <sup>3</sup> (т) Asphalt mix storage / capacity m <sup>3</sup> (t)	відсік прямого завантаження – 4,2 (7,6) відсік асфальтобетонної суміші – 22,4 (40,3) direct loading compartment – 4,2 (7,6) asphalt mix compartment – 22,4 (40,3)
Місткість бункера для наповнювача (мінерального порошку), м <sup>3</sup> Capacity of the filler (limestone powder) hopper, m <sup>3</sup>	32,5
Місткість бункера пиловловлювача, м <sup>3</sup> Dust hopper capacity, m <sup>3</sup>	32,5
Тип пиловловлювача Type of dust hopper	рукавний фільтр, що регенерується за рахунок тяги димососа bag filter, regenerated through the draft of the smoke extractor
Площа фільтрації рукавних фільтрів, м <sup>2</sup> Filtration area of bag filters, m <sup>2</sup>	509
Загальна місткість бітумних цистерн, м <sup>3</sup> Total capacity of bitumen tanks, m <sup>3</sup>	2 · 50 = 100
Розмір майданчик для обладнання, м · м Equipment area size, m · m	41 · 32

**ДОДАТОК 4. ВИТРАТИ МАТЕРІАЛІВ  
НА ПРИГОТУВАННЯ ОДНІЄЇ ТОННИ  
АСФАЛЬТОБЕТОНУ**

**APPENDIX 4. MATERIAL  
CONSUMPTION FOR PREPARING ONE  
TONNE OF ASPHALT CONCRETE**

Складова Component	Одиниця вимірювання Unit of measurement	Тип суміші Mix type	
		грубозерниста (AC-25) coarse-grained (AC-25)	дрібнозерниста (AC-13) fine-grained (AC-13)
Крупний заповнювач (щебінь) 25-40 мм Coarse aggregate (crushed stone) 25-40 mm	кг kg	278	–
Крупний заповнювач (щебінь) 20-25 мм Coarse aggregate (crushed stone) 20-25 mm	кг kg	202	–
Крупний заповнювач (щебінь) 5-10 мм Coarse aggregate (crushed stone) 5-10 mm	кг kg	154	396
Крупний заповнювач (щебінь) 3-5 мм Coarse aggregate (crushed stone) 3-5 mm	кг kg	76	114
Дрібний заповнювач (пісок) Fine aggregate (sand)	кг kg	210	340
Наповнювач (мінеральний порошок) Filler (limestone powder)	кг kg	38	94
Асфальтове в'язуче (бітум) Asphalt binder (bitumen)	кг kg	42	56

**ДОДАТОК 5. ІНШІ ВЕЛИЧИНИ, ЩО  
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ  
РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ  
ПРИ ПРИГОТУВАННІ  
АСФАЛЬТОБЕТОННОЇ СУМІШІ**

**APPENDIX 5. OTHER VALUES USED  
FOR CALCULATING THE ENERGY  
CONSUMPTION OF ASPHALT  
CONCRETE MIX PREPARING**

Параметр Parameter	Значення Value
<i>Фізичні характеристики матеріалів Physical specifications of materials</i>	
Вологість матеріалів (піску та щебеню), % Moisture content of materials (sand and crushed stone), %	10
Середня насипна щільність асфальтобетонної суміші, кг/м <sup>3</sup> Averaged bulk density of asphalt mix, kg/m <sup>3</sup>	1800
Щільність крупнозернистого асфальтобетону, кг/м <sup>3</sup> Density of coarse-grained asphalt concrete, kg/m <sup>3</sup>	2340
Щільність дрібнозернистого асфальтобетону, кг/м <sup>3</sup> Density of fine-grained asphalt concrete, kg/m <sup>3</sup>	2380
<i>Час виконання технологічних операцій, с <sup>a)</sup> Technological operations time, s <sup>a)</sup></i>	
Зважування кам'яних матеріалів Aggregates weighing	44 (30)
Дозування бітуму Dosage of bitumen	12 (12)
Завантаження та змішування заповнювачів у змішувальній установці («сухе» змішування) Loading and mixing aggregates in mixer (“dry” mixing)	23 (8)
Заливання бітуму в змішувач Pouring bitumen into the mixer	10 (10)
Змішування заповнювачів із бітумом («мокре» змішування) Mixing aggregates with bitumen (“wet” mixing)	35 (30)
Вивантаження асфальтобетонної суміші Asphalt mix unloading	12 (12)
Загальна тривалість робочого циклу <sup>b)</sup> Total duration of the working cycle <sup>b)</sup>	124 (90)
<p><sup>a)</sup> Числа без дужок – час технологічних операцій для виготовлення дрібнозернистої асфальтобетонної суміші. Цифри в дужках – час технологічних операцій для виготовлення крупнозернистої асфальтобетонної суміші.</p> <p><sup>a)</sup> Non-bracket numbers are the time of technological operations for the fine-grained asphalt mix manufacturing. The numbers in brackets are the time of technological operations for the coarse-grained asphalt mix manufacturing.</p> <p><sup>b)</sup> Загальна тривалість не включає дозування бітуму, оскільки ця операція виконується одночасно зі зважуванням заповнювачів.</p> <p><sup>b)</sup> Total duration does not include dosage of bitumen because this operation is performed simultaneously with aggregates weighing.</p>	

**ДОДАТОК 6. ПАЛИВО, НЕОБХІДНЕ ДЛЯ  
ВИСУШУВАННЯ ЗАПОВНЮВАЧА (НА  
АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ЗАВОДАХ)  
(WOODROW J.H., ТАБЛ. 16 [5])**

**APPENDIX 6. FUEL REQUIRED TO  
DRY AGGREGATE (ASPHALT  
PLANTS) (WOODROW J.H., TABLE 16  
[5])**

Вологість заповнювача (%) Moisture content of aggregate (%)	Мазут № 2 на кг заповнювача (л/кг) No. 2 fuel oil per kg of aggregate (l/kg)
10	0,013
9	0,012
8	0,011
7	0,010
6	0,009
5	0,008
4	0,007
3	0,006
2	0,006

**ДОДАТОК 7. ОРІЄНТОВНЕ  
ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ НА  
ЗВИЧАЙНИХ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ  
ЗАВОДАХ <sup>A)</sup> (WOODROW J.H., ТАБЛ. 17  
[5])**

**APPENDIX 7. ESTIMATED ENERGY USE  
IN CONVENTIONAL ASPHALT PLANT  
OPERATIONS <sup>A)</sup> (WOODROW J.H.,  
TABLE 17 [5])**

Обладнання Item	Гарячий асфальтобетон (BTU/т) Hot-mixed asphalt concrete (Btu/ton)	Гарячий асфальтобетон (кДж/кг) Hot-mixed asphalt concrete (kJ/kg)
Зберігання асфальту <sup>b)</sup> Asphalt storage <sup>b)</sup>	6 400	7,443
Холодна подача <sup>b)</sup> Cold feed <sup>c)</sup>	4 730	5,501
Сушарка та витяжні вентилятори тощо <sup>r)</sup> Dryer and exhaust fans, etc. <sup>d)</sup>	4 770	5,548
Змішувальна установка <sup>а)</sup> Mixing plant <sup>e)</sup>	3 920	4,559
Всього Total	19 820	23,051
Округлено Rounded	19 800	23,027

<sup>a)</sup> На основі даних Інституту асфальту.

<sup>a)</sup> Based on data from the Asphalt Institute.

<sup>b)</sup> При середньому використанні заводу.

<sup>b)</sup> Based on average plant use.

<sup>b)</sup> При витраті бензину 7 галон/год і продуктивності 200 т/год плюс 0,07 (к.с.·год)/тонну, розрахованих на 0,06 галон/год і дві третини експлуатаційної ефективності.

<sup>c)</sup> Based on gasoline use of 7 gal/hr with production of 200 ton/hr plus 0,07 (hp·hr)/ton calculated at 0,06 gal/(hp·hr) and two-thirds operational efficiency.

<sup>r)</sup> При 0,95 к.с.·год/тонну при двох третинах експлуатаційної ефективності та 0,06 галон/(к.с.·год).

<sup>d)</sup> Based on 0,95 (hp·hr)/ton at two-thirds operational efficiency and 0,06 gal/(hp·hr).

<sup>a)</sup> При 0,78 (к.с.·год)/тонну при двох третинах експлуатаційної ефективності та 0,06 галон/(к.с.·год).

<sup>e)</sup> Based on 0,78 (hp·hr)/ton at two-thirds operational efficiency and 0,06 gal/(hp·hr).

**ДОДАТОК 8. ВИТРАТА ПАЛЬНОГО  
ВАНТАЖІВКАМИ, ЯКІ ПЕРЕВОЗЯТЬ  
ДОРОЖНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ  
(WOODROW J.H., ТАБЛ. 14 [5])**

**APPENDIX 8. ESTIMATES OF FUEL USE  
BY TRUCKS HAULING HIGHWAY  
CONSTRUCTION MATERIALS  
(WOODROW J.H., TABLE 14 [5])**

Матеріал, який перевозиться Material hauled	Тип техніки Type of equipment	Середня витрата пального (миль/галон) Average fuel economy (mpg)	Повне навантаження (тонн) Assumed full load (tons)	Витрата пального <sup>a)</sup> Fuel use <sup>a)</sup>		
				галон/ ам.тонн·милю) gal/(ton·mi)	BTU/ ам.тонн·милю) Btu/(ton·mi)	л/(кг·км) l/(kg·km)
Заповнювач, пісок, асфальтобетон, портланд-цемент Aggregate, sand, asphalt cement, portland cement	дизель 5-вісний diesel 5 axle	5	22	0,0182	2500	0,0000472
Асфальто-бетонна гаряча суміш, перероблений матеріал, портланд-цемент, бетон Asphalt hot mix, recycled material, portland cement, concrete	дизель 3-вісний diesel 3 axle	7	10	0,0286	4000	0,0000742
	бензин 3-вісний gasoline 3 axle	5	10	0,0400	5560	0,0001037

<sup>a)</sup> Вважається, що транспортні засоби рухаються в один бік повністю завантаженими, а повертаються порожніми. Пройдена відстань дорівнює подвоєній відстані між пунктом відправлення та пунктом доставки. Якщо транспортні засоби завантажені в обидва боки, використання палива буде приблизно вдвічі меншим від наведених значень.

<sup>a)</sup> Vehicles are assumed to move one way fully loaded and return empty. Distance travelled is twice the distance between the point of origin and the point of delivery. If vehicles are loaded both ways, fuel use would be approximately one-half of the values given.

**ДОДАТОК 9. ПЕРЕРАХУНОК ЕНЕРГІЇ  
ПЕРЕРОБКИ ТА ТЕПЛОТВОРНОЇ  
ЕНЕРГІЇ В ЕКВІВАЛЕНТ  
ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ТА ОДИНИЦІ  
СИ <sup>A)</sup> (WOODROW J.H., ТАБЛ. B-1 [5])**

**APPENDIX 9. PROCESSING AND  
CALORIFIC ENERGY FACTORS IN  
TERMS OF EQUIVALENT GALLONS OF  
DIESEL FUEL <sup>A)</sup> (WOODROW J.H.,  
TABLE B-1 [5])**

Матеріал Material	Коефіцієнт перерахунку Conversion factor	Еквівалент дизельного палива Diesel fuel equivalent		кДж/кг kJ/kg	кДж/л kJ/l	л/кг l/kg
		на галон per gal	на ам. тонну per ton			
Енергія переробки ( $E_p$ ) Processing energy ( $E_p$ )						

Портланд-цемент Portland cement	7,232·10 <sup>6</sup> BTU/ам.тонну 7,232·10 <sup>6</sup> Btu/ton		52,03	8410,816		
Асфальтобетон Asphalt cement	587 000 BTU/ам.тонну 587 000 Btu/ton		4,22	682,681		
Щебінь Crushed aggregate	58 100 BTU/ам.тонну 58 100 Btu/ton		0,42	67,570		
Пісок, гравій Sand, gravel	15 000 BTU/ам.тонну 15 000 Btu/ton		0,11	17,445		
Мінеральний порошок Filler	58 100 BTU/ам.тонну 58 100 Btu/ton		0,42	67,570		
Емульсія CMS-2 CMS-2 emulsion	10 200 BTU/галон 10 200 Btu/gal	0,073			2842,903	
	241 галон/ам.тонну 241 gal/ton		17,6			1,006
Бітум MC-70 MC-70 cutback	59 500 BTU/галон 59 500 Btu/gal	0,428			16583,602	
Арматурна сталь Reinforcing steel	24·10 <sup>6</sup> BTU/ам.тонну 24·10 <sup>6</sup> Btu/ton		172,7	27912,000		
<i>Теплотворна (калорійна) енергія (E<sub>h</sub>)</i> <i>Calorific energy (E<sub>h</sub>)</i>						
Асфальтобетон Asphalt cement	37,1·10 <sup>6</sup> BTU/ам.тонну 37,1·10 <sup>6</sup> Btu/ton		266,9	43147,300		
Емульсія CMS-2 CMS-2 Emulsion	115 000 BTU/галон 115 000 Btu/gal	0,827			32052,340	
Бітум MC-70 MC-70 cutback	148 000 BTU/галон 148 000 Btu/gal	1,065			41249,968	
Портланд-цемент, заповнювач, пісок, щебінь Portland cement, aggregate, sand, gravel		–	–			

<sup>a)</sup> Перераховано для 139 000 BTU/галон.

<sup>a)</sup> Converted on basis of 139 000 Btu/gal.