

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**КОМАРИСТА БОГДАНА МИКОЛАЇВНА**



УДК 504.7.064.3:614(083,74)

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

21.06.01 – Екологічна безпека

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми 2014

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

**Статюха Геннадій Олексійович**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
завідувач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент

Козуля Тетяна Володимирівна

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків,  
професор, кафедра комп'ютерного моніторингу і логістики

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Проскурнін Олег Аскольдович,  
Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» Міністерства екології та природних ресурсів, м. Харків,  
старший науковий співробітник

Захист відбудеться 23 травня 2014 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Автореферат розісланий « 18 » квітня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої  
вченої ради К 55.051.04

Л.Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Відповідно до концепції сталого розвитку (СР) і ролі кожного підприємства в життєдіяльності країни, підприємства повинні прагнути до впровадження стійко функціонуючих високотехнічних, екологічно безпечних технологій, здатних забезпечувати випуск продукції, яка задовольняє вимогам міжнародних стандартів шляхом врахування всіх стадій життєвого циклу (ЖЦ) продукції, в тому числі стадії використання ресурсів, стадії споживання та стадії утилізації. Важливість проблеми охорони навколишнього середовища та можливих впливів, пов'язаних з виготовленням і споживанням продукції, підвищує інтерес до розробки методів, спрямованих на зниження цих впливів. Одним з методів, що розробляються для цієї мети, є оцінка життєвого циклу (ОЖЦ).

Вирішенню проблем оцінювання екологічних показників в концепції СР присвячені праці багатьох вчених зокрема українських: Г.О. Статюхи, Т.В. Бойко, І.Б. Абрамова, В.І. Бендюга, С.П. Іванюти, В.В. Трофімовича, О.М. Трофимчука, В.М. Удод. В їхніх роботах розкрито переважно питання оцінювання показників екологічної безпеки та ризиків на різних етапах функціонування промислових об'єктів, але не розглядається окремо характеристики і властивості продукту та його вплив на навколишнє природне середовище (НПС) протягом всіх етапів його ЖЦ. Проблемами СР, а також ОВЖЦ продукту займалися наступні вчені: М.З. Згуровський, Г.О. Статюха, В.І. Бендюг, І.М. Джигирей, І.Б. Скворцов, Б. В. Мисник, О.М. Міночкіна, Н.М. Єршова, Х.В. Горбова, Л.П. Гринаш. В їхніх роботах більше розглядаються проблеми глобального та регіонального СР, та проводяться спроби ОЖЦ продукту з економічної точки зору, при цьому недостатньо уваги приділяється екологічному впливу продукту на різних етапах його ЖЦ.

Метод ОЖЦ знаходиться на ранній стадії розробки. Деякі складові методу, наприклад оцінка впливу, знаходяться на стадії становлення, тому необхідно виконати значну роботу і накопичити практичний досвід, щоб перейти до наступного рівня практичного застосування методу ОЖЦ. Таким чином, важливо правильно інтерпретувати і відповідно застосовувати результати ОЖЦ. Актуальним є проведення досліджень різних стадій ЖЦ продукції та розробка методичного забезпечення для оцінки впливу життєвого циклу (ОВЖЦ) продукту на НПС, що є невід'ємною складовою для планування СР технологічних систем, які задіяні у виробництві певного промислового продукту.

**Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в рамках державних замовлень на науково-технічні праці згідно наукових напрямків Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут»: № 2032 «Оцінювання та аналізування екологічної сталості різномасштабних об'єктів» (номер держреєстрації 0107U002381), 2009р.; № 2998 «Розробка енергозберігаючих та екологічних гібридних технологічних процесів знешкодження шкідливих викидів» (номер держреєстрації 0106U006722), 2006-2008рр.; № 2362 «Впровадження принципів сталого розвитку в регіональне екологічне оцінювання, технології та виробництва» (номер державної реєстрації 0110U000386), 2009-2010 рр.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розв'язання науково-практичної задачі оцінки впливу на навколишнє природне середовище продукції виробництва на різних стадіях життєвого циклу. Поставлена мета досягається шляхом розробки методичного забезпечення розрахунку індикаторів та індексів, які відображають рівень сталості, збалансованості життєвого циклу продукту та його вплив на навколишнє природне середовище та здоров'я людини.

Відповідно до мети дисертаційної роботи поставлені такі задачі дослідження:

1) оцінити існуючі метрики і методології з аналізу відповідності природоохоронній політиці виробництва, як стадії життєвого циклу продукції, та проаналізувати індикатори, які застосовуються для визначення впливу на навколишнє природне середовище;

2) провести аналіз стадій життєвого циклу промислового продукту щодо встановлення рівня екологічної безпеки технологічної системи, рівня споживання природних ресурсів та ефективності їх використання;

3) розробити показники, що характеризують різні стадії життєвого циклу продукційної системи з огляду їхнього впливу на навколишнє природне середовище та людину;

4) розробити методичне забезпечення з оцінки відповідності життєвого циклу продукції вимогам екологічної безпеки, положенням сталого розвитку з метою впровадження у «Світовому центрі даних з геоінформатики та сталого розвитку»;

5) розробити програмний комплекс для оцінювання показників впливу продукту на навколишнє природне середовище з метою порівняльного аналізу екологічної стійкості життєвого циклу різних типів цементу, вирощування озимої пшениці із застосуванням азотного добрива та оцінювання сталості ресурсоспоживання при виробництві рулонних покрівельних матеріалів.

*Об'єктом дослідження* є вплив продукційної системи на навколишнє природне середовище.

*Предметом дослідження* є характеристики, показники, індикатори впливу на навколишнє природне середовище стадій життєвого циклу продукційної системи.

**Методи дослідження:** системний аналіз для визначення структури життєвого циклу продукційної системи; методи математичної статистики для створення індикаторів оцінки стадій життєвого циклу продукту; методи нейронних мереж для побудови математичної моделі оцінки впливу життєвого циклу продукту.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

У дисертації одержано такі нові наукові результати:

- вперше застосовано теорію природного капіталу для аналізу життєвого циклу продукції з метою запровадження узагальненої оцінки здатності системи відновлювати й компенсувати використані ресурси;
- вперше розроблено методологію оцінки матеріально-ресурсної складової системи виробництва на основі універсального показника - матеріального індексу сталого ресурсоспоживання для оцінювання впливу життєвого циклу на природні системи і людину з використанням теорії природного капіталу та монетаризації;
- розроблено спосіб для аналізу енергоефективності виробництва за допомогою індексів енергоємності охорони навколишнього середовища, енергоємності енергоресурсів та енергоємності вихідної продукції, сировини та матеріалів;

- розроблено методику визначення екологічної складової життєвого циклу стосовно впливу на навколишнє природне середовище стадій його виробництва шляхом розрахунку індексів забруднення поверхневих вод, атмосфери та ґрунтів;
- розроблено методологію для аналізу ефективності використання природних ресурсів протягом життєвого циклу продукту відповідно до індексів ресурсоефективності за співвідношенням використаних сировинних ресурсів, очікуваного часу використання продукту та витрат на його утилізацію;
- розроблено методику комплексної оцінки шкідливого впливу продукту на навколишнє природне середовище протягом його життєвого циклу на основі індексу шкідливості продукту з врахуванням категорій негативного впливу на різних стадіях життєвого циклу.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Надане у роботі методичне забезпечення на основі індексного методу для оцінювання рівня впливу життєвого циклу продукту на стан довкілля і здоров'я людини дозволило отримати такі результати його практичного застосування:

- розроблений універсальний показник сталого ресурсоспоживання для порівнювання варіантів продукційних систем, є основою при прийнятті рішень стосовно створення нових продуктів та вдосконалення існуючих;
- розроблена методологія для оцінки шкідливого впливу продукту, яка дозволяє визначити негативний вплив його життєвого циклу на екосистеми, зміну клімату, виснаження ресурсів та здоров'я людини, розрахувати дійсну вартість продукту і порівняти продукти між собою за їх впливом на навколишнє природне середовище;
- створене методичне забезпечення комплексної оцінки різних стадій життєвого циклу продукту, яке надає змогу оцінити енергоємність, забруднення атмосфери, поверхневих вод та ґрунтів, ефективність використання сировинних ресурсів на стадії виробництва продукту, оцінити ефективність його використання протягом терміну служби, оцінити витрати на утилізацію на завершальній стадії життєвого циклу;
- створене програмне забезпечення для зручності проведення розрахунків впливу на різних стадіях життєвого циклу продукту на основі розроблених індексних показників, а також створена нейронна мережа для автоматизованої оцінки впливу життєвого циклу продукту шляхом віднесення його до однієї з п'яти категорій впливу, що дозволяє порівнювати між собою вплив життєвих циклів різних продуктів;
- проведено оцінювання екологічної стійкості двох типів цементу; оцінювання сталості ресурсоспоживання при виробництві рулонних покрівельних матеріалів; порівняння сталості життєвого циклу вирощування озимої пшениці із застосуванням азотного добрива.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики й алгоритму оцінювання життєвого циклу продукції на стадії проектування та експлуатації впроваджено у «Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку», який є частиною системи Світових центрів даних Міжнародної ради з науки. Сутність методики полягає в дослідженні впливу продукту на навколишнє природне середовище та оцінюванні ресурсовитрат на всіх стадіях життєвого циклу продукційних систем (*акт впровадження від 15 листопада 2013 року*).

Методика й алгоритм оцінки життєвого циклу промислово-продукційних систем впроваджена в навчальний процес на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ» для дипломного проектування бакалаврів, лекційного курсу та семінарських занять з дисципліни «Основи сталого розвитку суспільства», що відповідає учбовому плану та навчальній програмі, рекомендованій методичною радою НТУУ «КПІ» (протокол №10 від 16.06.2011 р.) (*акт впровадження від 05 листопада 2013 року*).

**Особистий внесок здобувача** полягає в такому:

- сформульовані мета і задачі дослідження;
- проаналізовані існуючі методи оцінки сталого розвитку та екологічної безпеки технологічних систем;
- розглянуто та проаналізовано взаємозв'язок між сталим розвитком суспільства та стандартами серії ISO 9000, ISO 14000, ISO 14040;
- запропоновано керувати сталістю продукційних систем на основі аналізу життєвого циклу;
- проаналізовано існуючі моделі та методи оцінки впливу життєвого циклу продукційної системи та їх етапи;
- запропоновано метод оцінювання впливу життєвого циклу продукційної системи на виснаження ресурсів, здоров'я людини, зміну клімату й екосистеми на основі розроблених індексних показників, унітарних індексів сталого ресурсоспоживання, виробничої енергоємності, виробничого забруднення, ефективності використання природних ресурсів, шкідливого впливу продукту та оцінки впливу життєвого циклу продукту;
- створено нейронну мережу для оцінки негативного впливу життєвого циклу продукційної системи з використанням розробленої методики;
- створено програмно-обчислювальний комплекс на базі методики оцінки впливу життєвого циклу продукційної системи;
- проведені розрахунки впливу життєвого циклу для двох типів цементу, морозостійкого та звичайного, трьох видів рулонних покрівельних матеріалів та циклу вирощування озимої пшениці із застосуванням азотного добрива.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційного дослідження доповідалися та одержали схвалення на Міжнародному семінарі «Комп'ютерне матеріалознавство і забезпечення якості», Одеса, 2006 р.; I-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, 2006 р.; Міжнародній науково – практичній конференції «Перший Всеукраїнський з'їзд екологів (ECOLOGY - 2006)», Вінниця, 2006 р.; Міжнародній конференції «Srodowisko, energia, biosistemy, bezpieczenstwo, materialy», Ржешов, Польща, 2007 р.; X-ій Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, 2007 р.; XI-ій Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ, 2008 р.; Першій науково-практичній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях», Черкаси, 2008 р.; 35<sup>th</sup> International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering, Словачія, 2008 р.; Міжнародній конференції 21<sup>st</sup> international Committee on Data for Science and Technology (CODATA), Київ, 2008 р.; на XII-ій Міжнародній науково-практичній

конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ, 2009 р.; на I-му Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 2009 р.; II-му Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology - 2009), Вінниця, 2009 р.; Міжнародному форумі «Міжрегіональні проблеми екологічної безпеки» (МПЕБ-2009), Одеса, 2009 р.; XIII-ій Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство», Київ, 2010 р.; II-ій науково-практичній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток», Київ, 2010 р.; XXV-ій міжнародній науковій конференції «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25», Харків, 2012 р.; III-ій міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку», Рубіжне, 2012 р.

**Публікації.** За темою дисертаційного дослідження опубліковано 30 друкованих робіт, в тому числі 11 у наукових фахових виданнях, 4 у наукометричних базах даних та 15 тез доповідей міжнародних та науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 203 сторінках, у тому числі основний текст на 114 сторінках, ілюструється 34 таблицями, 39 рисунками, містить перелік умовних скорочень, складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 137 найменувань на 15 сторінках, 4 доданків на 43 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, зв'язок дисертації з науковими програмами та планами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів та коротко викладено основні положення дисертації.

**У першому розділі** «*Існуючі системи оцінювання сталого розвитку*» проаналізовано сучасні розробки систем індикаторів, зокрема. Індекс екологічної сталості ESI–2005, який дозволяє оцінити ступінь використання природних ресурсів суспільством і характер взаємодії суспільства з навколишнім середовищем. Індекси екологічної керованості - EPI, оцінює поточні екологічні умови та здоров'я населення, щоб забезпечити політичних діячів інформацією, яку вони можуть використовувати при формуванні та оцінці політичних відгуків на екологічні виклики (проблеми). Індекс Екологічний слід (Footprint) вимірює споживання населенням продовольства і матеріалів в еквівалентах площі біологічно продуктивної землі і площі моря, необхідної для секвестрування відповідних викидів CO<sub>2</sub>. Міжнародні стандарти серії ISO 9000 «Система менеджменту якості.», стандарти серії ISO 14000 «Екологічний менеджмент» та стандарти серії ISO 14040 «Оцінка життєвого циклу».

Задача визначення методичних засад до оцінки впливу стадій ЖЦ продукту (рис. 1) на НПС є актуальною і необхідною для реалізації положень екологічного менеджменту і концепції СР.

**У другому розділі** «*Оцінювання шкідливості продукту протягом його життєвого циклу*» описується створена методика визначення рівня шкідливості продукту на різних стадіях ЖЦ.

Метою оцінювання впливу життєвого циклу (ОВЖЦ) є інтерпретація даних інвентаризації його стадій. Вона включає три обов'язкові етапи: категоризацію (визначення категорій впливу); класифікацію (розподілення даних інвентаризації між категоріями впливу); характеристизацію (оцінювання результатів). І три необов'язкові етапи: нормалізація (віднесення усіх впливів до єдиної шкали вимірювання); групування; сортування або зважування впливів згідно їх відносної важливості; інколи додають етап аналізування якості даних.

На основі аналізу категорій й підкатегорій впливу, які використовуються у різних методах ОВЖЦ, виділено 17 підкатегорій впливу, які стали нижнім рівнем ієрархії оцінювання (рис. 1). Пропонується згрупувати категорії впливу в наступні категорії захисту «Здоров'я (людини)», «Екосистеми», «Клімат» і «Ресурси», об'єднання яких дозволяє одержати індекс шкідливості ПС  $J_{HSD}$ .

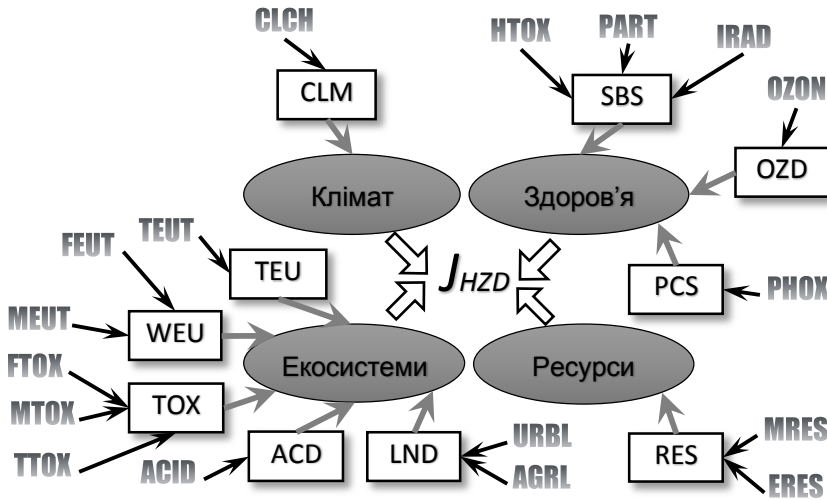


Рисунок 1 - Схема визначення рівня шкідливості ПС

Етапи визначення необхідних середніх точок (категорій впливу), класифікації й характеристизації фази ОВЖЦ не залежать від запропонованої моделі оцінювання, тому методика розрахунку значення  $J_{HSD}$  починається з необов'язкових етапів ОВЖЦ.

Етап визначення необхідних середніх точок (категорій впливу), класифікації й характеристизації фази ОВЖЦ не залежать від запропонованої моделі оцінювання, тому методика розрахунку значення  $J_{HSD}$  починається з необов'язкових етапів ОВЖЦ.

Етап характеристизації дозволяє отримати індикатори підкатегорій впливу:

$$J_{SIM_i} = \sum_j (E_j) \cdot k_{CHR_{i,j}}, \quad (1)$$

де  $J_{SIM_i}$  – значення індикатору віднесене до функціональної одиниці (ФО) для  $i$ -ї підкатегорії впливу;  $E_j$  – викиди  $j$ -ї шкідливої речовини або споживання  $j$ -го ресурсу на ФО;  $k_{CHR_{i,j}}$  – характеристизаційний коефіцієнт  $j$ -го викиду або  $j$ -го ресурсу для  $i$ -ї підкатегорії впливу.

Визначення індикаторів категорій впливу пропонується здійснювати з нормалізацією індикаторів підкатегорій та рівноцінним зважуванням згідно (2):

$$J_{IMP_k} = \sum_i (J_{SIM_i}) / k_{NRM_i}, \quad (2)$$

де  $J_{IMP_k}$  – значення індикатору для  $k$ -ї категорії впливу;  $J_{SIM_i}$  – значення індикатору для  $i$ -ї підкатегорії впливу;  $k_{NRM_i}$  – коефіцієнт нормалізації для  $i$ -ї підкатегорії впливу.

Для отримання індикаторів категорій захисту використана процедура групування:

$$J_{PTC_l} = \sum_k J_{IMP_k} \cdot K_{WCF_k}, \quad (3)$$

де  $J_{PTC_l}$  – значення індикатору для  $l$ -ї категорії захисту;  $J_{IMP_k}$  – значення індикатору для  $k$ -ї категорії впливу;  $K_{WCF_k}$  – коефіцієнт зважування для  $k$ -ї категорії впливу.



Для визначення коефіцієнтів зважування користуються принципом «близькість до цілі». Цільові значення відповідають екологічним задачам Кіотського протоколу, Декларації тисячоліття, національним стратегіям СР або екологічної політики країни / групи країн. Такий підхід є об'єктивним, але викликає труднощі при визначенні конкретних значень коефіцієнтів зважування, що усунуто за допомогою застосування панельного дослідження.

Індекс шкідливості продукту  $J_{HZD}$  дорівнює сумі індикаторів категорій захисту:

$$J_{HZD} = \sum_l J_{PTC_l} = J_{HLT} + J_{ECS} + J_{CLT} + J_{RCS}, \quad (4)$$

де  $J_{PTC_l}$  – значення індикатору віднесене для  $l$ -ї категорії захисту;  $J_{HLT}$  - індекс шкоди здоров'ю людини;  $J_{ECS}$  індекс шкоди екосистемам;  $J_{CLT}$  - індекс шкоди клімату;  $J_{RCS}$  - індекс шкоди природним ресурсам (табл. 1).

Таблиця 1 - Відповідність значень індексів ОВЖЦ рівню впливу продукту на НС та здоров'я людини

$J_{STU}$	Рівень сталості продукційної системи				
	$J_{STU} < 1$	$1 \leq J_{STU} < 1,5$	$1,5 \leq J_{STU} < 2$	$2 \leq J_{STU} < 2,5$	$J_{STU} \geq 2,5$
	еталонний стан	стан добрий	стан задовільний	стан незадовільний	критичний стан
$J_{ECE}, J_{ECG}, J_{ECP}, J_{ENT}$	Рівень енергоємності продукту				
	$J_i < 0,1$	$0,1 \leq J_i < 0,3$	$0,3 \leq J_i < 0,6$	$0,6 \leq J_i < 0,9$	$J_i \geq 0,9$
	еталонний стан	стан добрий	стан задовільний	стан незадовільний	критичний стан
$J_{PSW}$	Рівень скидів у поверхневій воді				
	$J_{PSW} < 2$	$2 \leq J_{PSW} < 4$	$4 \leq J_{PSW} < 6$	$6 \leq J_{PSW} < 8$	$J_{PSW} \geq 8$
	еталонний стан	стан добрий	стан задовільний	стан незадовільний	критичний стан
$J_{APL}$	Рівень забрудненості атмосфери				
	$J_{APL} < 2,5$	$2,5 \leq J_{APL} < 7,5$	$7,5 \leq J_{APL} < 12,5$	$12,5 \leq J_{APL} < 22,5$	$22,5 \leq J_{APL} < 52,5$
	чиста атмосфера	слабо забруднена	забруднена	сильно забруднена	високо забруднена
$J_{SPL}$	Рівень забруднення ґрунтів				
	$J_{SPL} < 1$	$1 \leq J_{SPL} < 2$	$2 \leq J_{SPL} < 5$	$5 \leq J_{SPL} < 10$	$J_{SPL} \geq 10$
	незабруднений	слабо забруднений	середньо-забруднений	сильно забруднений	дуже сильно забруднений
$J_{REF}$	Рівень ресурсоефективності				
	$J_{REF} < 2$	$2 \leq J_{REF} < 5$	$5 \leq J_{REF} < 7$	$7 \leq J_{REF} < 10$	$J_{REF} \geq 10$
	дуже високий	високий	середній	низький	дуже низький
$J_{ULF}$	Час розкладу				
	$J_{ULF} < 2$	$2 \leq J_{ULF} < 4$	$4 \leq J_{ULF} < 8$	$8 \leq J_{ULF} < 10$	$J_{ULF} \geq 10$
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий
$J_{WSG}$	Рівень утворення відходів				
	$J_{WSG} < 0,5$	$0,5 \leq J_{WSG} < 2$	$2 \leq J_{WSG} < 4$	$4 \leq J_{WSG} < 8$	$J_{WSG} \geq 8$
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий
$J_{CLT}, J_{RCS}, J_{HLT}, J_{ECS}$	Рівень шкідливості продукту				
	$0 \leq J_i < 10$	$10 \leq J_i < 30$	$30 \leq J_i < 60$	$60 \leq J_i < 90$	$J_i \geq 90$
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий

З метою приведення до єдиної безрозмірної шкали оцінювання запропонований унітарний індекс шкідливого впливу продукту  $I_{HIP}$  ( $0 \leq I_{HIP} \leq 1$ ):

$$I_{HIP} = \exp(-\exp(1,135 - 3,293 \cdot 10^{-2} \cdot J_{HZD})). \quad (5)$$

Таким чином, унітарний індекс  $I_{HIP}$  дозволяє провести однозначне порівнювання декількох ПС за рівнем їх шкідливого впливу протягом ЖЦ.

У третьому розділі «Використання теорії природного капіталу для оцінювання життєвого циклу продукту» запропонований універсальний показник сталого ресурсоспоживання для оцінювання впливу продукції на природні системи та здоров'я людини і, таким чином, визначення природно-відновлювальної характеристики виробництва за вимогами концепції СР на усіх рівнях ЖЦ.

Проаналізовано можливості методик з оцінювання впливу продукційних систем (ПС) на довкілля і людину. ПС являє собою сукупність одиничних процесів з елементарними і матеріальними потоками, які виконують одну або більше певних функцій, і є складовими життєвого циклу продукту. Розглянуто метод «Stepwise 2006», який ґрунтується на таких методах оцінювання впливу ПС як «ІМРАСТ 2002+» та «EDIP 2003».

Оцінювання природно-відновлювальної характеристики ПС пропонується

проводити за допомогою порівняння витрат на «вироблення – споживання – видалення» продукту протягом його ЖЦ і витрат на відновлення використаних ресурсів, природних систем й здоров'я людини.

$$J_{STU} = \frac{C_{RCS} + C_{PRD}}{C_{NRG} + C_{HLZ} + C_{EST}}, \quad (6)$$

де  $J_{STU}$  – матеріальний індекс сталого ресурсоспоживання;  $C_{RCS}$  – витрати на сировину, у.о.;  $C_{PRD}$  – витрати з вироблення, споживання і видалення продукту, у.о.;  $C_{NRG}$  – витрати з відновлення енергоресурсів, мінеральних ресурсів і т.п., додаткова енергія необхідна в майбутньому на видобування ресурсів, у.о.;  $C_{HLZ}$  – витрати з відновлення здоров'я людини, у.о.;  $C_{EST}$  – витрати з відновлення екосистем, у.о.

Екологічно сталою є така система з точки зору збереження природно-відновлювального потенціалу, для якої  $J_{STU} < 1$  для розглядуваної ПС. Запропонований індекс сталого ресурсоспоживання є оцінкою необхідних витрат на підтримання екологічної сталості ПС, і може бути використаний для порівнювання варіантів ПС, прийняття рішень для розроблення нових продуктів та вдосконалення існуючих (табл. 1).

Для приведення до єдиної безрозмірної шкали оцінювання запроваджено унітарний індекс сталого ресурсоспоживання  $I_{SUR}$  ( $0 \leq I_{SUR} \leq 1$ ):

$$I_{SUR} = \exp(-\exp(-2,452 - 1,976 \cdot J_{STU})). \quad (7)$$



Рисунок 2 - Стадії ЖЦ продукції

У четвертому розділі «Зведена методологія оцінки впливу життєвого циклу продукту» обґрунтовано основні положення запропонованої методики ОВЖЦ продукту з урахуванням його основних стадій.

Повна енергоємність продукції розраховується за формулою:

$$e = e_r + e_m + e_f + e_w + e_e, \quad (8)$$

де  $e$  – повна енергоємність продукції у МДж/НО (натуральні одиниці) виміру продукту;  $e_r$  – повна енергоємність енергоресурсів, необхідних для виробництва продукту, МДж/НО продукту;  $e_m$  – повна енергоємність вихідної продукції, сировини та матеріалів, необхідних для виробництва продукту, МДж/НО продукту;  $e_f$  – повна енергоємність основних виробничих фондів, амортизованих під час виробництва продукту, МДж/НО продукту;  $e_w$  – повна енергоємність відтворення робочої сили під час виробництва продукту, МДж/НО продукту;  $e_e$  – повна енергоємність охорони НПС під час виробництва продукту, МДж/НО продукту.

Для оцінки енергоємності охорони НПС, енергоресурсів та ВПСМ (вихідна продукція, сировина, матеріал) розраховують відповідні безрозмірні індексні показники:

$$J_{ECE} = \frac{e_e}{e - e_e}, \quad J_{ECG} = \frac{e_r}{e - e_r}, \quad J_{ECP} = \frac{e_m}{e - e_m}, \quad (9)$$

де  $J_{ECE}$  – індекс енергоємності охорони НПС під час виробництва продукту;  $J_{ECG}$  – індекс енергоємності енергоресурсів, необхідних для виробництва продукту;  $J_{ECP}$  – індекс енергоємності ВПСМ, необхідних для виробництва продукту.

На основі вище наведених індексних показників розрахуємо загальний індекс енергоємності ПС  $J_{ENT}$  (табл. 1):

$$J_{ENT} = \sqrt[3]{J_{ECE} \cdot J_{ECG} \cdot J_{ECP}}. \quad (10)$$

Отримане значення індексу енергоємності  $J_{ENT}$  за допомогою функції бажаності Харінгтона переводимо до стандартної безрозмірної шкали бажаності і отримуємо унітарний індекс виробничої енергоємності ПС (табл. 2):

$$I_{NRG} = \exp(-\exp(1,135 - 3,293 \cdot J_{ENT})). \quad (11)$$

Скиди за одиницю часу (рік, доба) на одиницю продукту в поверхневій воді встановлюють за індексом забруднення поверхневих вод  $J_{PSW}$  (табл. 1):

$$J_{PSW} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_{WTR_i}}{\Gamma DC_i} \right) + \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \left( \frac{T_{WSW_j}}{T_{AWB_j}} \right), \quad (12)$$

де  $E_{WTR_i}$  – маса  $i$ -ї небезпечної речовини, що потрапляє в стічні води, т/рік;  $\Gamma DC_i$  – максимальна маса  $i$ -ої забруднюючої речовини, що дозволена до надходження у водний об'єкт із стічними водами, т/рік;  $T_{WSW_j}$  – фактична середньомісячна температура стоків за  $j$ -й місяць року, °C;  $T_{AWB_j}$  – допустима середньомісячна температура стоків за  $j$ -й місяць року, °C;  $n$  – кількість забруднюючих речовин у стічних водах.

$$E_{WTR_i} = (V_{MNF} + V_{HSH} - V_{LSS}) \cdot C_i, \quad (13)$$

$V_{MNF}$  – об'єм води, що використовується для виробничих потреб, м<sup>3</sup>/рік;  $V_{HSH}$  – об'єм води, що використовується для господарсько-побутових потреб, м<sup>3</sup>/рік;  $V_{LSS}$  – об'єм

безповоротного споживання води, м<sup>3</sup>/рік;  $C_i$  – середньорічна концентрація  $i$ -ї речовини у стоку, т/ м<sup>3</sup>.

$$T_{AWB_j} = T_{PND_j} + 3^\circ\text{C}, \quad (14)$$

де  $T_{PND_j}$  - середньомісячна температура води у водоймищі за  $j$ -й місяць року, °C.

Для зведення до єдиної шкали оцінювання розраховуємо унітарний індекс забруднення поверхневих вод  $I_{SRW}$  ( $0 \leq I_{SRW} \leq 1$ ):

$$I_{SRW} = \exp(-\exp(0,8712 - 0,3952 \cdot J_{PSW})). \quad (15)$$

Для оцінки рівня забруднення атмосфери при виробництві одиниці продукції запропоновано індекс забруднення атмосфери  $J_{APL}$  (табл. 1):

$$J_{APL} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{E_{ATM_i}}{\text{ГДВ}_i} \cdot \sum_{j=1}^m \text{ІЗА}_j}, \quad (16)$$

де  $E_{ATM_i}$  – кількість  $i$ -ї забруднюючої речовини, що потрапляє в атмосферу, кг/доба; ГДВ <sub>$i$</sub>  – гранично допустимий викид в атмосферу, кг/доба;  $n$  – кількість забруднюючих речовин; ІЗА <sub>$j$</sub>  – парціальний індекс забрудненості атмосфери  $j$ -ю речовиною;  $m$  – кількість забруднюючих речовин з найбільшим значенням ІЗА ( $m = 5$ ).

Таблиця 2 - Відповідність значень унітарних індексів рівню впливу ЖЦ продукту на НС та здоров'я людини

Значення унітарного індексу	$0 \leq I_i < 0,2$	$0,2 \leq I_i < 0,37$	$0,37 \leq I_i < 0,63$	$0,63 \leq I_i < 0,8$	$0,8 \leq I_i < 1$
$I_{SUR}$	<i>Рівень сталості ресурсоспоживання продукційної системи</i>				
	еталонний стан	стан добрий	стан задовільний	стан незадовільний	критичний стан
$I_{NRG}$	<i>Рівень виробничої енергоємності продукту</i>				
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий
$I_{PLT}$	<i>Рівень виробничого забруднення НПС</i>				
	незабруднене	слабо забруднене	середньо забруднене	сильно забруднене	дуже сильно забруднене
$I_{ENR}$	<i>Рівень ефективності використання природних ресурсів</i>				
	дуже високий	високий	середній	низький	дуже низький
$I_{HIP}$	<i>Рівень шкідливого впливу продукту</i>				
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий
$I_{LCIA}$	<i>Рівень впливу життєвого циклу продукту</i>				
	дуже низький	низький	середній	високий	дуже високий

Для єдиної шкали оцінки надано унітарний індекс забруднення атмосфери  $I_{ARP}$ :

$$I_{ARP} = \exp(-\exp(0,5748 - 3,952 \cdot 10^{-2} \cdot J_{APL})). \quad (17)$$

При оцінюванні рівня забруднення ґрунтів запропоновано індекс забруднення ґрунтів  $J_{SPL}$  (табл. 1):

$$J_{SPL} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ГДК}_i}, \quad (18)$$

де  $C_i$  – фактична концентрація  $i$ -го хімічного компоненту в ґрунті; ГДК <sub>$i$</sub>  – гранично

допустима концентрація  $i$ -ого хімічного компонента в ґрунті;  $n$  – кількість забруднюючих речовин.

Для зведення до єдиної шкали оцінювання розраховують унітарний індекс забруднення ґрунтів  $I_{SCT}$  ( $0 \leq I_{SCT} \leq 1$ ):

$$I_{SCT} = \exp(-\exp(0,8712 - 0,3952 \cdot J_{SPL})). \quad (19)$$

Вплив продукту на стадії виготовлення на НПС оцінюють за допомогою унітарного індексу виробничого забруднення НПС  $I_{PLT}$  (табл. 2):

$$I_{PLT} = \sqrt[3]{I_{SRW} \cdot I_{ARP} \cdot I_{SCT}}. \quad (20)$$

Для оцінки ресурсоефективності етапу виробництва продукту пропонується враховувати кількість сировинних ресурсів, необхідних для виробництва одиниці продукції за допомогою індексу ресурсоефективності  $J_{REF}$  (табл. 1):

$$J_{REF} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{RWM_i}}{m_{PRD} \cdot n}, \quad (21)$$

де  $m_{PRD}$  – маса одиниці продукції, кг;  $M_{RWM_i}$  – маса сировини  $i$ -го виду, що була витрачена на виготовлення одиниці продукції, за одиницю часу, кг/доба;  $n$  – кількість одиниць продукції, які виготовлені за одиницю часу, доба<sup>-1</sup>.

Для приведення індексу  $J_{REF}$  до єдиної шкали оцінювання з межами від 0 до 1, запропоновано використати унітарний індекс ресурсоефективності  $I_{RSE}$ :

$$I_{RSE} = \exp(-\exp(0,97 - 0,247 \cdot J_{REF})) \quad (22)$$

Час розкладу в природі складових продукту та час корисного використання продукту визначають за індексом часу корисного використання продукту  $J_{ULF}$  (табл. 1):

$$J_{ULF} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{DCM_i}}{t_{LFT} \cdot n}, \quad (23)$$

де  $t_{LFT}$  – час служби продукції, років;  $t_{DCM_i}$  – час повного розкладу в природі  $i$ -го складового компонента продукту, років;  $n$  – кількість складових з тривалим часом розкладу в природі.

На основі індексу часу корисного використання продукту отримують унітарний індекс часу корисного використання продукту  $I_{USF}$  ( $0 \leq I_{USF} \leq 1$ ):

$$I_{USF} = \exp(-\exp(0,97 - 0,247 \cdot J_{ULF})). \quad (24)$$

Відходи за одиницю часу (рік, доба) на одиницю продукту (виготовленого за той самий час) оцінюють за коефіцієнтом утворення відходів  $k_{WST}$ :

$$k_{WST} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{WST_i}}{m_{PRD} \cdot k}, \quad (25)$$

де  $M_{WST_i}$  – маса  $i$ -го виду відходів, які утворюються при виробництві продукту за одиницю часу (доба), кг;  $m_{PRD}$  – маса одиниці продукції, кг;  $k$  – кількість одиниць продукту, які виготовляються за одиницю часу (доба);  $n$  – кількість видів відходів.

Для оцінки рівня утворення відходів на стадії ЖЦ як при виробництві продукту, так і на стадії його утилізації з урахуванням можливості вторинної переробки, повторного використання чи захоронення, застосовано індекс утворення відходів (табл. 1):

$$J_{WSG} = \frac{2+k_{RCL}}{1+2 \cdot k_{RCL}} \cdot (2 \cdot k_{WST} \cdot k_{DSP} + 0,5 \cdot k_{WST} \cdot (1 - k_{DSP})), \quad (26)$$

де  $k_{WST}$  – коефіцієнт утворення відходів;  $k_{RCL}$  – коефіцієнт (доля) вторинної переробки;  $k_{DSP}$  – коефіцієнт (доля) захоронення або спалювання відходів.

Оцінка ступеню утворення відходів під час ЖЦ продукту за єдиною безрозмірною шкалою визначена унітарним індексом утворення відходів  $I_{WST}$  ( $0 \leq I_{WST} \leq 1$ ):

$$I_{WST} = \exp(-\exp(0,7583 - 0,2823 \cdot J_{WSG})). \quad (27)$$

Загальний рівень витрат на утилізацію та переробку продукту і відходів, які утворені на етапі його виробництва, встановлюється за унітарним індексом ефективності використання природних ресурсів  $I_{ENR}$  (табл. 2):

$$I_{ENR} = \sqrt[3]{I_{RSE} \cdot I_{USF} \cdot I_{WST}}. \quad (28)$$

Унітарний індекс ОВЖЦ продукту  $I_{LCIA}$  розраховується на основі отриманих значень унітарних індексів життєвого циклу (табл. 2):

$$I_{LCIA} = \sqrt[5]{I_{SUR} \cdot I_{NRG} \cdot I_{PLT} \cdot I_{ENR} \cdot I_{HIP}}. \quad (29)$$

Схематичне зображення методики ОВЖЦ продукту наведено на рис. 3.

На основі 14 індексів першого рівня нами запропоновано використати математичний апарат нейронних мереж для отримання унітарного індексу оцінки впливу життєвого циклу продукту  $I_{LCIA}$  (рис. 3).

Побудована нейронна мережа методом багатошарового перцептрон у якості вихідних змінних використовує 14 індексів оцінки різних стадій ЖЦ, містить 5 прихованих рівнів та видає категорію впливу за унітарним індексом ОВЖЦ у якості результуючої змінної (рис. 4). Після створення структури нейронної мережі був проведений етап навчання, на якому у якості навчальної вибірки були прийняті вихідні та цільова змінна, отримані за залежностями описаними в розділах 2-4.

Нейронна мережа MLP 14-5-5 показала достатню адекватність прийняття рішень з відносною похибкою, яка не перевищувала 6%. Як наслідок отримана нейронна мережа за методом класифікації на основі багатошарового перцептрон може використовуватись для ранжування впливу ЖЦ продукту на НПС, на основі 14 вихідних індексів першого рівня, які мають відмінні шкали оцінювання та, відповідно різну вагу. Нейронна мережа зводить вихідні змінні до єдиної шкали та відносить ЖЦ продукту до певної категорії впливу на основі унітарного індексу ОВЖЦ (рис. 4).

Таким чином створена нейронна мережа спільно з розробленим програмним комплексом дозволять в автоматизованому режимі оцінювати вплив ЖЦ продукту і прогнозувати можливе його значення в залежності від зміни вихідних параметрів. Це дозволяє знайти оптимальні параметри, з метою вдосконалення технологічної системи чи інших етапів ЖЦ продукту.

**У п'ятому розділі** «Застосування методології оцінки впливу життєвого циклу» описується створений на основі методології програмний комплекс та наводяться приклади застосування розробленої методології.

Проведено оцінювання екологічної сталості двох ПС: звичайного (C20/C25) і морозостійкого бетонів (C35/C45), з отриманням модифікованих коефіцієнтів сталого

ресурсоспоживання. Усі розрахунки проводились на ФО вказаних ПС, а саме 1 м<sup>3</sup> бетону. Виробничо-споживацькі витрати охоплюють витрати на ресурси, у т.ч. енерго-ресурси, та їх транспортування, витрати на виготовлення і транспортування бетону, витрати на знесення конструкцій.

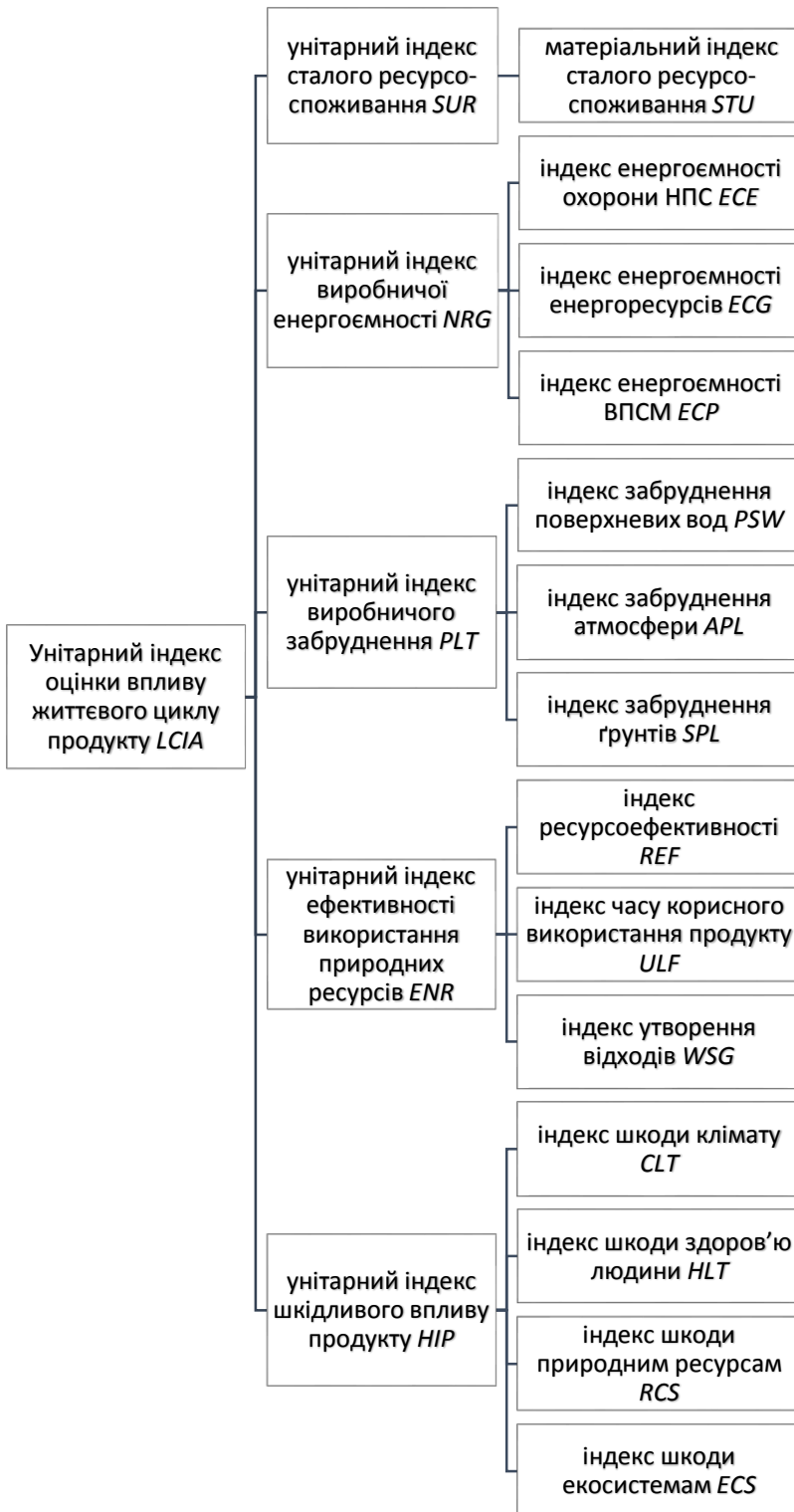


Рисунок 3 - Схема методології розрахунку ОБЖЦ

Етапи спорудження й експлуатація виключені з розгляду, оскільки енерговитрати значно коливаються у залежності від типу бетонних конструкцій. В результаті були отримані значення коефіцієнтів  $J_{STU_{oc}} = 0,56$  для (C20/C25) та  $J_{STU_{frc}} = 0,66$  для (C35/C45). У разі здійснення заходів ПС звичайного бетону мала б більшу ступінь екологічної стійкості або вищий природно-відновлювальний потенціал ніж ПС морозостійкого бетону.

Також було проаналізовано сталість ресурсоспоживання трьох ПС, а саме виробництва рулонних покрівельних матеріалів (типу руберойду) III, IV та VI типів згідно стандарту ASTM D2178-97a «Типові ТУ для бітумованого покрівельного картону, використовуюваного для покрівельних й гідроізоляційних робіт». За допомогою бази даних «ІМРАСТ 2002+», що містить коефіцієнти шкоди різних сполук здоров'ю людини й екосистемам отримані оцінні витрати на відновлення ресурсів, здоров'я людини й екосистем у розмірі 5806 грн для продукції III типу, 5284 грн для продукції IV типу та 5650 грн для продукції VI типу.

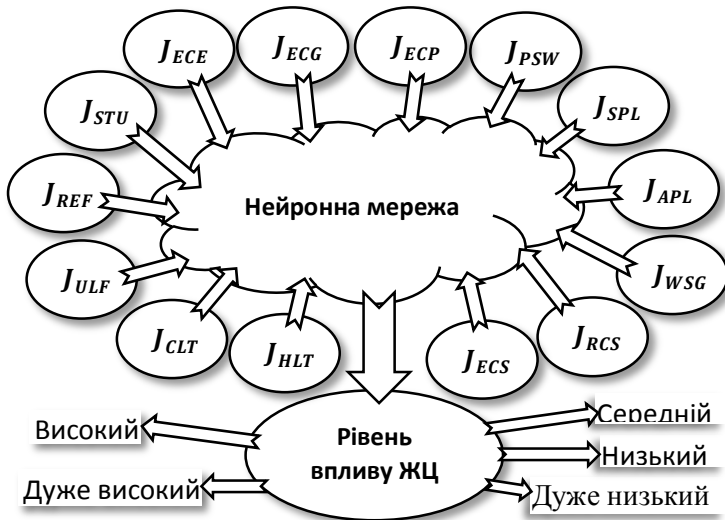
Розраховані значення відновлювальних витрат і коефіцієнтів сталого ресурсоспоживання ( $J_{STU_{III}} = 1,41$ ,  $J_{STU_{IV}} = 1,56$ ,  $J_{STU_{VI}} = 1,57$ ) показують, що ПС матеріалів VI типу за оцінними показниками є більш нестала, тобто більше шкодить довкіллю. Крім того, розрахункові

значення  $J_{STU}$  дозволяють судити про необхідність вкладення не менш ніж 60-70% від ресурсних витрат на виготовлення продукції у відновлення здоров'я людини, екосистем і ресурсів.

$$\left( \frac{1}{J_{STU_{III}}} \cdot 100\% = 71\%, \quad \frac{1}{J_{STU_{IV}}} \cdot 100\% = 64\%, \quad \frac{1}{J_{STU_{VI}}} \cdot 100\% = 64\%, \right)$$

І навіть у такому випадку розглядувані ПС будуть лише наближатись до визначення їх як «систем сталого ресурсоспоживання».

В роботі було порівняно декілька варіантів вирощування озимої пшениці із за-



стосуванням азотного добрива (нітрат амонію). Оцінювання включало такі етапи ЖЦ як видобування сировини, виробництво й транспортування (добрива, речовини захисту рослин, машини і насіння) та хліборобство (оброблення й засівання землі, удобрення, захист рослин, збирання врожаю й сушіння). Функціональною одиницею ОЖЦ є одна тонна зерна. Розрахунок індикаторів категорій захисту проводиться з використанням коефіцієнтів зважування категорій впливу і наведений в табл. 3.

Рис. 4. Схема розрахунку ОБЖЦ на основі індексу  $I_{LCIA}$  за допомогою нейронної мережі

Таблиця 3 - Індикатори категорій захисту

Варіант	1	2	3	4	5	6	7
Добрива, кг N/га	0	48	96	144	192	240	288
Здоров'я $J_{HLT}$	1,01	0,59	0,48	0,47	0,49	0,53	0,59
Екосистеми $J_{ECS}$	46,31	22,61	17,03	15,74	16,30	19,37	22,76
Клімат $J_{CLT}$	0,66	0,66	0,70	0,79	0,91	1,10	1,30
Ресурси $J_{RCS}$	40,83	43,05	42,61	42,47	42,48	43,28	44,68

Результати ОБЖЦ на основі індексу шкідливості продукту  $J_{HZD}$  представлені у табл. 4.

Таблиця 4 - Значення індексу шкідливості продукту  $J_{HZD}$  для різних варіантів

Варіант	1	2	3	4	5	6	7
Добрива, кг N/га	0	48	96	144	192	240	288
$J_{HZD}$	88,8	66,9	60,8	59,5	60,2	64,3	69,3
Рейтинг за $J_{HZD}$	7	5	3	1	2	4	6

Згідно значень  $J_{HZD}$  наведених у табл. 4 найкращим варіантом оцінюваної ПС виявився №4 з використанням 144 кг N/га. Індекс  $J_{HZD}$  у даному випадку одночасно враховував і виснаження ресурсів, і вплив на екосистеми, й додатково включав оцінку впливу викидів на здоров'я людини. Внесок категорії захисту «Здоров'я» у загальне



значення індексу на порядок менше ніж таких категорій як «Ресурси» й «Екосистеми», але не варто нею нехтувати у розрахунках для ПС цієї й суміжних галузей виробництва, хоча звісно це залежить від мети дослідження й сфери застосування результатів ОВЖЦ.

## ВИСНОВКИ

1. У роботі проаналізовані існуючі системи індексних показників, міжнародні стандарти, які описують різні аспекти СР, що стало підставою для визначення підходів з оцінки ступеня використання природних ресурсів в технологіях виробництва і характеру впливу ЖЦ продукту на НПС.

2. На основі положень теорії природного капіталу вперше запроваджено узагальнену оцінку здатності системи відновлювати й компенсувати використані ресурси. Вперше розроблено методику для оцінки матеріально-ресурсної складової системи виробництва на основі унітарного індексу сталого ресурсоспоживання для ОВЖЦ на НПС і людину з використанням теорії природного капіталу та монетаризації.

3. Вперше запропонована методологія ОВЖЦ продукту з урахуванням енергетичної складової, на основі унітарного індексу виробничої енергоємності продукту, що був утворений на базі ДСТУ 3682-98; екологічної складової, з урахуванням забруднення атмосфери, поверхневих вод та ґрунтів на основі загальноприйнятих показників ІЗА<sub>5</sub>, ГДС та ГДК з використанням розробленого унітарного індексу виробничого забруднення; ефективності використання природних ресурсів з урахуванням сировинних витрат, часу корисного використання продукту та часу розкладу і можливості вторинної переробки утворених після утилізації продукту відходів, з використанням розробленого унітарного індексу ефективності використання природних ресурсів.

4. Аналіз ЖЦ продукту зі встановлення рівня екологічної безпеки технологічної системи дозволив розробити методику оцінки шкоди продукту НПС на основі унітарного індексу шкідливого впливу продукту, який включає 17 підкатегорій впливу, згрупованих у наступні категорії захисту: здоров'я людини, екосистеми, клімат і ресурси.

5. На основі запропонованої методики ОВЖЦ продукту на НПС і людину створено комп'ютерну програму з метою автоматизації обробки вхідних даних і проведення розрахунків для прийняття управлінських рішень з удосконалення ЖЦ та підвищення рівня його сталості, безпечності для НПС і людини.

6. Розроблена нейронна мережа на базі багатошарового перцептронну для отримання відповіді у вигляді класифікації негативного впливу ЖЦ продукту за п'ятирівневою шкалою оцінки.

7. Практичне застосування розробленого методичного забезпечення з ОВЖЦ продукції та відповідності ЖЦ вимогам екологічної безпеки та СР полягає: в оцінюванні екологічної сталості двох типів цементу; оцінюванні сталості ресурсоспоживання при виробництві рулонних покрівельних матеріалів; порівнянні сталості ЖЦ вирощування озимої пшениці із застосуванням азотного добрива.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Статюха Г.А. Стандарты управления окружающей средой и связь с устойчивым развитием / Г.А. Статюха, Б.Н. Комаристая // Спец. вип. за матеріалами Міжнар. наук.-практ. конф. «І Всеук. з'їзд екологів». Вісник Вінницького політехнічного

ін-ту, 2006. - №5. - С. 63-66. *Дисертантом проаналізовано взаємозв'язок між СР суспільства та стандартами серії ISO 9000, ISO 14001, ISO 14040, ISO 14047.*

2. Статюха Г.А. Практические аспекты оценивания устойчивости технологических систем на базе теории природного капитала / Г.А. Статюха, И.Н. Джигирей, Б.Н. Комаристая // Вісник ЧДТУ. - 2008. - № 4. - С. 62-66. *Дисертантом виконано розрахунок коефіцієнта сталого ресурсоспоживання на основі аналізу ЖЦ.*

3. Бойко Т.В. Техногенна безпека як невід'ємна частина сталого розвитку регіонів України / Т.В. Бойко, В.І Бендюг, Б.М. Комариста // Східно-Європ. журнал передових технологій. - 2010. - №2/10 (44). - С. 52-54. *Дисертантом визначені індексні показники для оцінки небезпеки підприємства.*

4. Бойко Т.В. Оцінка ризику промислового підприємства на стадії проектування в рамках стратегії сталого розвитку / Т.В. Бойко, В.І Бендюг, Б.М. Комариста // Східно-Європ. журнал передових технологій. - 2012, №2/14 (56) - С. 13-17. *Дисертантом розглянуто теорію щодо управління СР на основі фінансової стратегії.*

5. Статюха Г.О. Зведена методика оцінювання шкідливого впливу продукції на довкілля / Г.О. Статюха, І.М. Джигирей, Б.М. Комариста // Східно-Європ. журнал передових технологій. Математика та кібернетика – фундаментальні і прикладні аспекти. - 2009. - № 1/6 (37). - С. 8-20. *Дисертантом розроблений індекс шкідливості продукту.*

6. Монетаризаційний метод оцінювання впливу життєвого циклу продукційної системи / Г.О. Статюха, І.М. Джигирей, Н.Є. Теліцина, Б.М. Комариста // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», № 659. 2009. - С. 169 - 172. *Дисертантом проаналізовано метод «Stepwise 2006».*

7. Statyukha G. Sustainable resource consumption assessment on LCA's basis / G. Statyukha, I. Dzhygyrey, V. Komarysta // Computer Aided Chemical Engineering. - Vol. 26. - 2009. - PP. 1111-1116. *Дисертантом використаний коефіцієнт сталого ресурсоспоживання для оцінки альтернативних систем каналізації.*

8. Product system sustainability assessment on monetary basis / M. Zgurovsky, G. Statyukha, I. Dzhygyrey, V. Komarysta // Proceed. of the 8th World Congr. of Chemical Engineering (WCCE8), Montreal, Canada, August 23-27, 2009. - GPOS-0198. *Дисертантом запропоновано коефіцієнт на основі ІАЖЦ.*

9. Комариста Б.М. Оцінка екологічної сталості життєвого циклу продукційних систем / Б.М. Комариста // Технологический аудит и резервы производства. - 2012. - № 6/1 (8). - С. 47 – 48.

10. Комариста Б.М. Екологічна складова в оцінці життєвого циклу продукції / Б.М. Комариста // Технологический аудит и резервы производства. - 2013. — № 5/4 (13). - С. 30 – 32.

11. Статюха Г.А. Проблемы построения метрик устойчивого развития для системного применения в оценивании взаимодействия общества с окружающей средой / Г.А. Статюха, И.Н. Джигирей, Б.Н. Комаристая // Восточно-Европ. журнал передовых технологий: Технология неорганических и органических веществ и экология. - 2008. - №6/4(36). - С. 19-26. *Дисертантом запропоновано коефіцієнт сталого ресурсозбереження.*

12. Оцінювання сталості ресурсоспоживання: Монетарний підхід / М.З. Згуровський, Г.О. Статюха, І.М. Джигирей, Б.М. Комариста // Матеріали II Всеукр. з'їзду екологів з міжн. участю (Екологія / Ecology-2009), Вінниця, 23-26 вересня 2009 р.: зб. наук. статей. - Вінниця: ФОП Данилюк, 2009. - С. 218-221. *Дисертантом запропоновано модифікований коефіцієнт сталого ресурсоспоживання.*

13. Статюха Г.О. Оцінювання сталості ресурсоспоживання продукційних систем на прикладі виробництва рулонних покрівельних матеріалів / Г.О. Статюха, І.М. Джигирей, Б.М. Комариста // Вісник Одеської держ. акад. будівництва і архітектури. - 2009. - Вип. 36. - С. 377-386. *Дисертантом проведено розрахунки коефіцієнта сталого ресурсоспоживання на прикладі рулонних покрівельних матеріалів.*

14. Бойко Т.В. Техногенна безпека як складова сталого розвитку / Т.В. Бойко, В.І. Бендюг, Б.М. Комариста // Вісник ЧДТУ. - 2009. - № 2. - С. 73-76. *Дисертантом запропоновано індекс природоохоронної ефективності.*

15. Бойко Т.В. Оцінка екологічного аспекту сталого розвитку промислових об'єктів / Т.В. Бойко, В.І. Бендюг, Б.М. Комариста // Зб. наук. статей III-ї міжнар. наук.-практ. конф. «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку», Київ – Рубіжне, 10 – 12 травня 2012. – С. 238 – 240. *Дисертантом проаналізовано питання СР в Україні для господарської діяльності підприємств.*

16. Statyukha G. Usage of sustainable development metrics for the enterprise estimation / G. Statyukha, B. Komarysta // XIX POLISH CONFERENCE OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING. Rzeszow, 3-7 September 2007. - Tom 2. - 235-238. *Дисертантом проаналізовані індекси екологічної сталості та екологічної керованості.*

17. Проблема забезпечення якості продукту і зв'язи з показателями устійчивого розвитку / Г.А. Статюха, Т.В. Бойко, А.А. Мороз, Б.Н. Комаристая // Матер. к 45-му междунар. сем-ру по моделюванню і оптимізації композитів – МОК'45. Одеса, 2006. - С. 24-25. *Дисертантом проаналізовано верхній та нижній рівні ієрархії оцінки СР підприємства за стандартами ISO 9000, ISO 14000 та ESI.*

18. Статюха Г.А. Организация мониторинга атмосферы на предприятии / Г.А. Статюха, В.И. Годзевич, Б.Н. Комаристая // Труды IX науч.-практ. конф. «Переработка энергоресурсных отходов. Обеспечение экологической безопасности». - 25-28 февраля 2006, Свалявский р-н, с.Поляна. – С. 62-65. *Дисертантом запропоновано систему керування якістю навколишнього середовища на основі ДСТУ ISO 14001.*

19. Организация мониторинга атмосферы на предприятии на идеях планирования эксперимента / Г.А. Статюха, P. Biswas, В.И. Годзевич, Б.Н. Комаристая // I Всеукр. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених. К. 2006. - С. 122. *Дисертантом проаналізовано питання екологічного моніторингу на підприємстві.*

20. Комаристая Б.Н. Индикаторы как основной элемент стандартов управления природной средой / Б.Н. Комаристая // Зб. тез доп. Екологія. Людина. Суспільство. X Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених. Київ, 2007. – С. 111.

21. Statyukha G. The system adaptation of environmental sustainable indices for the enterprise managing / G. Statyukha, E. Bondarenko, B. Komarysta // 35<sup>th</sup> International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering. Slovakia, 2008 – P. 116. *Дисертантом надано оцінку міжнародного стандарту серії ISO 14040 та індексу ESI.*

22. Бойко Т.В. Техногенна безпека в аспекті сталого розвитку / Т.В. Бойко, В.І. Бендюг, Б.М. Комариста // Тези доп. I-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю

«Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях», Черкаси, 2008 - С. 202-204. *Дисертантом досліджено питання використання індикатора техногенної безпеки.*

23. Статюха Г.А. Разработка коэффициента устойчивого ресурсосбережения на основе оценки жизненного цикла / Г.А. Статюха, И.Н. Джигирей, Б.Н. Комаристая // Тези доп. I-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю «Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях», Черкаси, 2008. - С. 228-230. *Дисертантом розроблено коефіцієнт сталого ресурсозбереження, на базі ОЖЦ.*

24. Комаристая Б.Н. Социальная технология по внедрению международного стандарта на предприятии / Б.Н. Комаристая, Н.Е. Телицына // Зб. тез доп. Екологія. Людина. Суспільство. XI Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених. К.: 2008. – 290-291. *Дисертантом запропоновано соціальні технології, як методи вирішення соціальних проблем формування умов життя та розвитку суспільства.*

25. Life cycle inventory as the basis for sustainable resource consumption estimation / M. Zgurovsky, G. Statyukha, I. Dzhygyrey, B. Komarysta // Abstracts of 21<sup>st</sup> international CODATA Conf., October 5-8, 2008, Kyiv, Ukraine. - P. 14. *Дисертантом запропоновано вимірювати природні ресурси в грошовому еквіваленті.*

26. Комариста Б.Н. Методологические аспекты экологического и социально-экономического устойчивого развития / Б.Н. Комаристая, В.И. Годзевич, В.И. Бендюг // Зб. тез XII Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. та мол. вчених «Екологія. Людина. Суспільство», Київ, 13-17 травня 2009 р. – К: Вид-во НТУУ «КПІ». – С. 236-237. *Дисертантом надана оцінка показника СР, розробленого Єльським Центром екологічної політики та права.*

27. Статюха Г.О. Оцінювання екологічної сталості продукційних систем / Г. О. Статюха, І.М. Джигирей, Б.М. Комариста // Зб. мат. I Міжнар. конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 28-29 травня 2009 р. Л.: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – С. 34-35. *Дисертантом проведено аналіз керування СР продукційних систем відповідно до циклів «споживання – відновлення».*

28. Монетаризованная оценка производственных систем для принятия решений в области социальной ответственности / Г.О. Статюха, І.М. Джигирей, А.В. Рубан, Б.М. Комариста // Сб. трудов XXVI межд. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–24», К.: в 10 т. Т. 4. Секция 4. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 15–17. *Дисертантом визначено процес «використання-відновлення» природних ресурсів для обґрунтування індикаторів СР (SDI).*

29. Бойко Т.В. Оцінка техногенної безпеки промислового підприємства в рамках стратегії сталого розвитку / Т.В. Бойко, В.І Бендюг, Б.М. Комариста // Україна: Схід – Захід - проблеми сталого розвитку: матеріали другого туру Всеукр. наук.-практ. конф. 24-25 листопада 2011 р., Львів: РВВ НЛТУ України. – Т.1. – С. 39-42. *Дисертантом проаналізовано стан промислових об'єктів з обігом небезпечних речовин.*

30. Бойко Т.В. Оценка экологической опасности проектируемого промышленного объекта / Т.В. Бойко, В.И Бендюг, Б.Н. Комаристая // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25: Сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: В10 т. Т. 2. Секция 3,4, Волгоград: Волгогр. гос. техн. у-нт, 2012; Харьков: Национ. техн. у-нт «ХПИ», 2012. - С. 106-108. *Дисертантом обґрунтовано доцільність введення індексу відносної небезпеки для розрахунку індексу регіональної небезпеки.*

## АНОТАЦІЯ

**Комариста Б.М. «Моделювання та розрахунок індикаторів сталого розвитку для технологічних систем». – Рукопис.**

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. - Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України. - Суми, 2014.

Дисертаційна робота присвячена оцінці впливу життєвого циклу продукційної системи на навколишнє природне середовище та здоров'я людини. Запропонована методологія оцінки впливу життєвого циклу продукту з урахуванням п'яти складових, які приведені до єдиної безрозмірної шкали оцінки від 0 до 1 за допомогою функції бажаності Харінгтона. Для оцінки рівня використання ресурсів запропонований унітарний індекс сталого ресурсоспоживання, який отриманий на основі коефіцієнту сталого ресурсоспоживання. Для врахування енергетичної складової створено на базі ДСТУ 3682-98 про енергозбереження унітарного індексу виробничої енергоемності продукту. Для оцінки забруднення атмосфери, поверхневих вод та ґрунтів на основі стандартизованих показників ІЗА<sub>5</sub>, ГДС та ГДК запропоновано унітарний індекс виробничого забруднення. Для оцінки ефективності використання природних ресурсів з урахуванням сировинних витрат, часу корисного використання продукту та часу розкладу і можливості вторинної переробки утворених після утилізації продукту відходів створено унітарний індекс ефективності використання природних ресурсів. Для оцінки шкоди продукту навколишньому середовищу на основі запропонованих в міжнародному стандарті показників оцінки шкоди життєвого циклу продукту на базі чотирьох категорії захисту: «Здоров'я людини», «Екосистеми», «Клімат» і «Ресурси», запропоновано унітарний індекс шкідливого впливу продукту. Розроблена нейронна мережа на базі багатошарового персептрону для отримання швидких відповідей у вигляді класифікації негативного впливу життєвого циклу продукту за п'ятирівневою шкалою оцінки. Проведені розрахунки екологічної сталості двох типів цементу; оцінювання сталості ресурсоспоживання при виробництві рулонних покрівельних матеріалів; порівняння сталості життєвого циклу вирощування озимої пшениці із застосуванням азотного добрива.

**Ключові слова:** життєвий цикл, продукційна система, оцінка життєвого циклу, індексна оцінка, оцінка впливу життєвого циклу, ресурсоспоживання, вплив на навколишнє середовище, енергоемність, сталий розвиток.

## АННОТАЦИЯ

**Комаристая Б.Н. «Моделирование и расчет индикаторов устойчивого развития для технологических систем». - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 - Экологическая безопасность. - Сумской государственной университет Министерства образования и науки Украины. - Сумы, 2014.

Диссертационная работа посвящена оценке влияния жизненного цикла продукционной системы на окружающую природную среду и здоровье человека. В работе рассмотрены существующие системы индексных показателей, применяемых для оценки устойчивого развития. Приведены международные стандарты, описывающие различные аспекты устойчивого развития, в том числе посвященные жизненному

циклу продукта и подходам к его оценке. Рассмотрены виды и теория природного капитала, применительно к оценке воздействия жизненного цикла продукционной системы. На основе коэффициента устойчивого ресурсопотребления разработан унитарный индекс устойчивого ресурсопотребления продукционной системы для оценки природно-возобновляемой характеристики продукционной системы с помощью сравнения затрат на «выработку - потребление - утилизацию» продукта в течение его жизненного цикла и затрат на восстановление использованных ресурсов, природных систем и здоровье человека. На базе ДСТУ 3682-98 по энергосбережению предложена методология оценки влияния жизненного цикла продукта с использованием унитарного индекса производственной энергоёмкости продукта для учета энергоёмкости охраны окружающей среды при производстве продукта, энергоёмкости энергоресурсов, необходимых для производства продукта и энергоёмкости выходной продукции, сырья и материалов, необходимых для производства продукта. Сбросы за единицу времени (год, сутки) на единицу продукта в поверхностные воды предлагаю оценивать с помощью унитарного индекса загрязнения поверхностных вод с использованием параметра предельно допустимых сбросов ПДС. Для оценки уровня загрязнения атмосферы промышленным объектом на этапе производства единицы продукции предлагаю использовать унитарный индекс загрязнения атмосферы с использованием парциального индекса загрязнения атмосферы ИЗА. При оценке уровня загрязнения почв промышленным объектом на этапе производства единицы продукции предлагаю использовать унитарный индекс загрязнения почв с использованием предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в почве ПДК. Для оценки ресурсоэффективности этапа производства продукта предлагается учитывать количество сырьевых ресурсов, необходимых для производства единицы продукции с помощью унитарного индекса ресурсоэффективности. С целью учета времени разложения в природе составляющих продукта и время полезного использования продукта предлагаю применить унитарный индекс времени полезного использования продукта. Для оценки уровня образования отходов на стадии жизненного цикла как при производстве продукта, так и на стадии его утилизации с учетом возможности вторичной переработки, повторного использования или захоронения, предлагаю применить унитарный индекс образования отходов. На основе анализа существующих категорий и подкатегорий воздействия, предложено 17 подкатегорий воздействия, сгруппированных в четыре категории защиты: «Здоровье человека», «Экосистемы», «Климат» и «Ресурсы», а также разработана на их основе методика оценки ущерба от продукта для окружающей среды, которая базируется на индексе ущерба климату, индексе ущерба здоровью человека, индексе ущерба природным ресурсам, индексе ущерба экосистемам. На основе разработанных индексов предложена методология оценки влияния жизненного цикла продукта с учетом пяти составляющих: унитарного индекса устойчивого ресурсопотребления; унитарного индекса производственной энергоёмкости; унитарного индекса производственного загрязнения; унитарного индекса эффективности использования природных ресурсов; унитарного индекса вредного воздействия продукта, которые приведены к единой безразмерной шкале оценки от 0 до 1 с помощью функции желательности Харрингтона. Создан программно-вычислительный комплекс на базе предложенной методологии с целью её реализации и ускорения обработки исходных данных, а также проведения расчетов для последующего

принятия управленческих решений с целью усовершенствования жизненного цикла и уровня его устойчивости, сохранения окружающей природной среды и здоровья человека. Разработана нейронная сеть на базе многослойного перцептрона для получения рекомендаций в виде классификации негативного воздействия жизненного цикла продукта по пятиуровневой шкале оценки. Проведены расчеты экологической устойчивости двух типов цемента (морозостойкого и обычного), оценки устойчивости ресурсопотребления при производстве трёх видов рулонных кровельных материалов, а также проведен анализ устойчивости жизненного цикла выращивания озимой пшеницы с применением азотного удобрения.

**Ключевые слова:** жизненный цикл, производственная система, оценка жизненного цикла, индексная оценка, оценка воздействия жизненного цикла, ресурсопотребление, влияние на окружающую среду, энергоёмкость, устойчивое развитие.

## SUMMARY

**Komarysta B.M. «Modeling and calculation of indicators of sustainable development for technological systems». - Manuscript.**

Thesis for a Candidate Degree in technical sciences, specialty 21.06.01 - Environmental Safety. - Sumy State University Ministry of Education and Science of Ukraine. - Sumy 2014.

The thesis is focused on assessing the impact of the life cycle of product system on the environment and human health. The methodology was proposed to assess the impact of the product life cycle based on five components. The components were converted to a single-dimensional rating scale from 0 to 1 using the Harrington desirability function. The unitary sustainable resource consumption index, which is derived from sustainable resource consumption factor to assess the level of resource use was worked out. The unitary index of industrial energy intensity of product system to account the energy component was formed on the basis of State Standard of Ukraine DSTU 3682-98 of energy conservation. Unitary index of industrial pollution involving the environmental component is based on normative maximum allowable concentrations. Unitary index of industrial pollution considers air pollution, surface water and soil contamination. Unitary index of efficiency of natural resources use takes into account commodity costs, the time of product beneficial use, the time of decay and the possibility of recycling the product formed after the disposal of waste. The unitary product hazard index is based on international standard indicators to assess damage to the product life cycle. The unitary index of harmful impact of the product takes into account four categories of protection: "Human Health", "Ecosystem", "Climate" and "Resources". The multilayer perceptron neural network was developed to get quick answers in the form of classification of the potential environmental impacts for a product system throughout the life cycle of the product by five-level evaluation scale. The environmental sustainability was assessed for two types of cement. The resource consumption sustainability was evaluated for the production of rolled roofing materials, as well as the sustainability of the life cycle of winter wheat using nitrogen fertilizer was compared.

**Keywords:** life cycle, product system, life cycle assessment, index score, life cycle impact assessment, resource consumption, environmental impact, energy, sustainable development.