

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ МУНІЦИПАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

Крот О.П., Косенко Н.О., Левашова Ю.С., Строгіна Т.С., Лебедєва О.С.
Харківський національний університет будівництва та архітектури
вул. Сумська, 40, 61002, м. Харків
nataliya1kosenko@gmail.com

На сьогодні немає однозначного і універсального методу для вибору технології знешкодження (утилізації) муніципальних відходів. Існує багато європейських методик по системі управління муніципальними відходами, які спираються на аналіз альтернатив по виділенню відходів (компостування, захоронення, утилізація, спалювання), або на аналізі варіантів розташування сміттєспалювальних підприємств. Кожен тип установки термічного знешкодження відходів має свої специфічні особливості і вимагає урахування конкретного критерію прийняття рішень. Зроблено порівняння обладнання для термічного спалювання відходів за такими факторами: найменший рівень негативного впливу на навколишнє середовище; залежність від попереднього сортування сміття; наявність подрібнення для полегшення подальшої переробки та підвищення однорідності; можливість отримання теплової та електричної енергії для різних систем використання тепла, що утворюється від спалювання побутових відходів; соціальне визнання. У роботі вперше розглянуто та запропоновано фактори, які впливають технологію термічного спалювання відходів в Україні, орієнтовну на відповідність формули R-1. Передбачається, що спалювання здійснюється з рекуперацією енергії, тобто спалювання без рекуперації енергії, єдиною метою якого є знищення відходів, не включено. Під час роботи були проаналізовані складові формули R1. Вираз має деякі невідповідності, які були розглянуті декількома дослідниками з моменту її введення. По-перше, формула не є термодинамічно коректною. При розрахунку за формулою R1 враховується ефективність використання енергії спалювання ТПВ, а не чиста вироблена енергія. Термін «вироблена енергія» відносять до валового виробництва енергії, а не до виробництва чистої енергії. З іншого боку, той факт, що електрика або тепло надходить в мережу, не обов'язково означає, що вони будуть використовуватися, враховуючи віддаленість сміттєпереробних підприємств. На основі запропонованого дослідження розкриваються сильні і слабкі сторони утилізації побутових відходів. *Ключові слова:* муніципальні відходи, багатокритеріальна оцінка, термічне знешкодження, спалювання, утилізація.

Analysis of environmental technologies for municipal waste disposal. Krot O., Kosenko N., Levashova Y., Strohina T., Lebedeva E.

There is no unambiguous and universal method for choosing the technology of disposal (utilization) of municipal waste to date. There are many European methods for municipal waste management, which are based on the analysis of alternatives for waste disposal (composting, disposal, utilization, incineration, dumping of wastes) or on the analysis of options for the location of incinerators. Each type of thermal waste disposal plant has its own specific features and requires consideration of a specific decision criterion. The comparison of equipment for thermal incineration of waste is made on the following factors: the lowest level of negative impact on the environment; dependence on pre-sorting of garbage; the presence of grinding to facilitate further processing and increase homogeneity; the possibility of obtaining heat and electricity for various systems of heat generated from the incineration of household waste; social recognition. The paper considers for the first time the factors influencing the technology of thermal waste incineration in Ukraine, indicative of compliance with the formula R-1. It is assumed that incineration is carried out with energy recovery, ie incineration without energy recovery, the sole purpose of which is the destruction of waste, is not included. The components of formula R1 were analyzed during the work. The expression has some inconsistencies that have been considered by several researchers since its introduction. First, the formula is not thermodynamically correct. When calculating according to the formula R1, the efficiency of solid waste combustion energy is taken into account, not the net energy produced. The term "energy produced" refers to the gross production of energy, not to the production of clean energy. On the other hand, the fact that electricity or heat enters the grid does not necessarily mean that they will be used given the remoteness of recycling plants. Based on the proposed study, the strengths and weaknesses of household waste disposal have been revealed. *Key words:* municipal waste, multi-criteria assessment, thermal neutralization, incineration, utilization.

Постановка проблеми. Для знешкодження, видалення або утилізації муніципальних відходів в усьому світі існує безліч технологій. Розроблені методи і моделі для опису цих технологій. Роль термічного знешкодження відходів у цих процесах досить суперечлива з екологічної точки зору. Сьогодні є багато дослідницьких груп, компанії, організації тощо, які зробили свій висновок і дали відповідну оцінку, чи можна спалювати відходи. За останні 20-30 років кілька дослідницьких груп аналізували вплив спалювання на довкілля порівняно з іншими видами поводження з відходами. Результати системних дослі-

джень розрізняються, хоча вони були ретельно проведені і вважаються об'єктивними. Водночас багато тематичних досліджень показують, що спалювання є важливим засобом скорочення кількості утворених відходів та вирішення інших завдань (наприклад, скорочення потреби у звалищах), інші показують протилежне. Очевидно, що існують відмінності у вхідних даних для цих досліджень (морфологічний склад відходів, межі систем, методи тощо), які можуть пояснити відмінності в кінцевих результатах.

Актуальність дослідження. В Україні склалася критична ситуація по своїй масштабності

й актуальності у наслідок перенакопичення полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Значна кількість полігонів не відповідає природоохоронним та санітарним вимогам, безконтрольне зберігання сміття в непризначених для цього місцях спричиняє серйозне забруднення навколишнього середовища, ступінь якого залежить від складу ТПВ, їх кількості, клімату та інших факторів. У свою чергу склад залежить від специфіки регіону, його кліматичних особливостей, наявності поблизу промислових підприємств і соціального рівня населення. З іншого боку існує проблема дефіциту горючих корисних копалин (газу, нафти та вугілля). Побутові відходи можуть бути альтернативним джерелом енергії, які знаходяться у величезній кількості та не потребують видобутку. Впровадження сучасних технологічних рішень термічного знешкодження побутових відходів з отриманням теплової та електричної енергії з нульовим впливом на навколишнє середовище досить актуальне питання.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає основним напрямкам наукової діяльності кафедри безпеки життєдіяльності та інженерної екології Харківського національного університету будівництва та архітектури. Деякі питання орієнтовані на «Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 року», а саме: розвиток роздільного збирання та перероблення відходів для підвищення ефективності використання природних ресурсів і переходу до сталої економіки; будівництво стаціонарних потужностей з термічної утилізації відходів, у тому числі з отриманням енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Європейський Союз має чітке завдання в системі управління відходами. Його довгострокова мета - стати суспільством з переробки відходів, мінімум утворення відходів та використання їх як енергетичний ресурс. Щороку Конфедерація європейських заводів із переробки відходів в енергію «Confederation of European Waste-to-Energy Plants» (CEWER) публікує карту європейських заводів з виробництва енергії з відходів на основі даних, отриманих від членів CEWER та національних джерел. Карта представлена на рис.1, синій колір – це заводи, що працюють в Європі, які перетворюють відходи в енергію (не враховуючи заводи для спалювання небезпечних відходів). Червоний колір – відходи термічно оброблені на заводах у мільйонах тонн. Дані надані членами CEWER та національними джерелами. Прикладом екологічності підприємства по спалюванню відходів є Amager Resource Center, який розташований у місті Копенгаген (Данія). Уся промислова зона, у тому числі підприємство, використовуються для паркової та спортивної зон (рис. 2).



Рис. 1. Перетворення відходів на енергію в Європі [1]

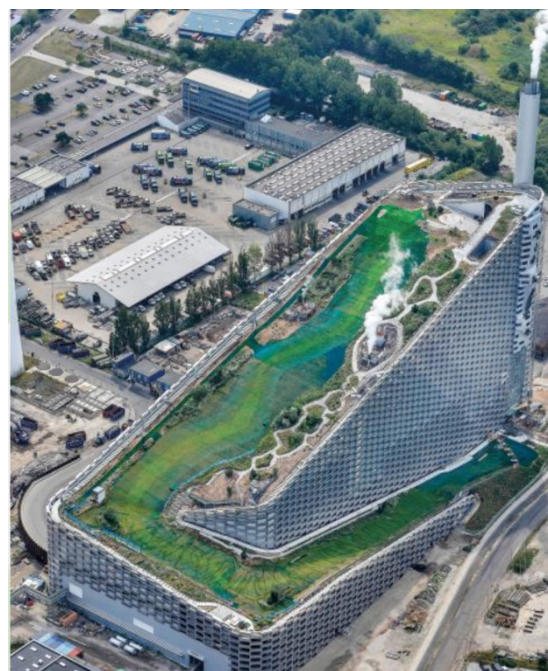


Рис. 2. Сміттєспалювальне підприємство у Копенгагені [2]

Автори [3] провели досконалий аналіз 20 міст різних країн, з різним кліматом, географічним походженням та економічним рівнем. Дослідження підтверджують, що неможливо чітко визначити «кращу» або «досконалішу» технологію для вирішення проблеми утилізації або переробки відходів. Будь-яка запропонована технологія має пройти ряд дуже строгих випробувань, а саме: оцінка морфологічного складу відходів; оцінка конкурентоспроможності конкретної технології у порівнянні з існуючою; доступність технології місцевій спільноті; рівень розвитку система

управління відходами. Виходячи з досвіду авторів [3], складні технології переробки відходів в енергію у більшості країн із середнім чи низьким рівнем доходів у середньостроковій перспективі можуть не отримати достатнього розвитку.

У світі користується величезною повагою Голландська система управління відходами [4]. Якоюсь мірою, національна політика управління відходами в Нідерландах останніми роками навіть вплинула на деякі європейські політики. В останні десятиліття, як і деякі інші розвинені країни, Нідерланди зіткнулися з проблемами збільшення матеріального споживання, відсутності фізичного простору та погіршення довкілля. У результаті уряд вирішив скоротити поховання відходів. Тому положення Нідерландів у галузі управління відходами може бути віднесене до загальнонаціональних зусиль щодо створення чітко визначеної національної політики у галузі управління відходами з кількісними цільовими показниками, а також із комплексною інфраструктурою обробки відходів. Було впроваджено контроль над процесами накопичення ТПВ, заборонено пряме видалення змішаних комунальних відходів на звалища та збільшено використання відходів до 86%.

Автори дослідження [5] розробили та оцінили показники екологічної ефективності системи поводження з відходами по таким країнам як Болгарія, Кіпр, Естонія, Греція, Литва та Словенія. Більшість країн, зберегли свої показники ефективності, і лише Чеська Республіка, Фінляндія, Ірландія, Мальта, Румунія та Словенія трохи покращили свої показники. У той же час можна помітити, що більшість країн мають вищі показники екологічної ефективності порівняно з минулими роками. Ці показники екологічної ефективності показують, що перехід до переробки відходів в енергію має дві основні мети, а саме: достатнє та стійке виробництво енер-

гії та ефективне оброблення ТПВ. Використання відходів для отримання енергії одночасно вирішує проблеми попиту на енергію, забезпечує управління відходами та викидами парникових газів, забезпечує надійну поставку енергії за розумними цінами для підприємств та споживачів та з найменшими екологічними ризиками.

У роботі [6] було зроблено оцінка енергетичного потенціалу ТПВ у місті Гавані. Середня низька теплотворна здатність відходів складала 7,74 МДж/кг і була отримана за допомогою різних моделей. Кількість викидів та енергії були визначені з масового та енергетичного балансів. Коефіцієнт R1 був вищим за 0,65, що свідчить про те, що завод з переробки відходів в енергію в Гавані можна розглядати як метод рекуперації енергії..

Країни з обмеженими природними ресурсами мають виявляти інтерес до повторного використання ресурсів. ТПВ є альтернативним джерелом енергії, яке не вимагає видобутку, транспортування та є невичерпним. Близько 250 мільйонів тонн твердих побутових відходів щорічно піддаються термічній обробці для виробництва електроенергії і тепла. Було побудовано 250 об'єктів які перетворюють відходи в енергію «Waste-to-energy» (WTE) протягом перших 15 років XXI століття, в основному в Європі й Східній Азії (рис.3).

Щодо питання екологічності спалювання відходів, завод з переробки відходів в енергію площею 41 000 м² з міським центром відпочинку та центром екологічної освіти у Копенгагені, відкриває нове покоління заводів з переробки відходів в енергію. На даху заводу розташовано лижний спуск, пішохідну стежку та стіна для скелелазіння. Метою Копенгагена – є стати першим у світі містом з нульовим викидом вуглецю.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

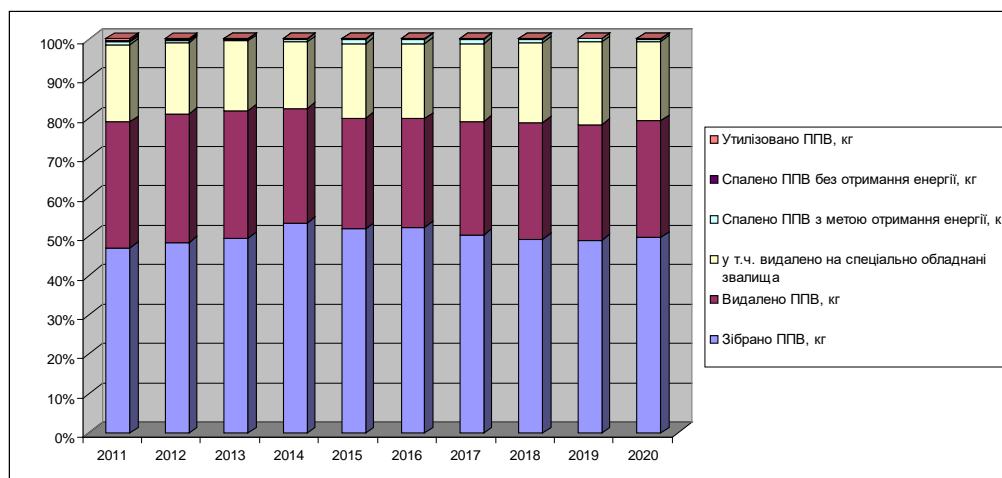


Рис. 3. Поводження з побутовими та подібними відходами за 2011-2020 роки у розрахунку кг відходів на одну особу

Протягом останніх 20-30 років кілька дослідницьких груп аналізували вплив термічного знешкодження відходів на навколишнє середовище, порівняно з іншими варіантами обробки та видалення відходів. Розроблено методи та моделі опису цих систем. Дослідження проводилися на місцевому, регіональному та національному рівні з використанням широкого спектру різних підходів до моделювання. Представлені результати та пропозиції щодо покращення технології термічного знешкодження. Залишається невирішеним питання відповідності технології термічного знешкодження муніципальних відходів міст України до Рамочної Директиви Європейського Союзу 2008/98/ЕС.

Новизна. У роботі вперше розглянуто та запропоновано фактори, які впливають технологію термічного спалювання відходів в Україні, орієнтовну на відповідність формули R-1. Передбачається, що спалювання здійснюється з рекуперацією енергії, тобто спалювання без рекуперації енергії, єдиною метою якого є знищення відходів, не включено.

Методологічне значення.

Рамочна Директива про відходи [7] введена в дію у 2008 році й визначає спалювання муніципальних відходів як операцію по відновленню, за умови, що вони відповідають певним критеріям. Метою цього визначення є сприяння використанню відходів для виробництва енергії в енергоефективних сміттєспалювальних установках і заохочування інновацій у термічне знешкодження відходів.

Згідно з Рамковою Директивою сміттєспалювальну установку для відновлення енергії характеризує так звана "Формула R1" – «відходи використовувати головним чином в якості палива або інших засобів для вироблення енергії». До таких установок відносять установки для спалювання, призначені для переробки твердих побутових відходів тільки у випадку, якщо їх ефективність використання енергії дорівнює або перевищує: 0,60 – для установок, що експлуатуються і пройшли перевірку на відповідність директиві [7] до 1 січня 2009 року та 0,65 – для установок, дозволених після 31 грудня 2008 року. Розглянемо основні складові формули для розрахунку енергоефективності. Відповідно до Додатка II Рамкової Директиви про відходи [7]. Для розрахунку енергоефективності пропонується використовувати «формулу R1»:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_f)} \quad (1.1)$$

де E_p – це кількість енергії, виробленої сміттєспалювальних установкою щорічно у вигляді електроенергії і тепла, в [ГДж/рік] або [МВт*годину/рік].

Для обчислення E_p використовується два фактора еквівалентності, як визначено в документі [15]. Кількість виробленої електроенергії E_{el} множиться на "2,6", тоді як кількість тепла - на "1,1" E_{th} . Фактор "2,6" для електрики заснований на середньому європейському коефіцієнті вугільних установок з 38%, що означає потребу в енергії 2,6 кВт*годин для виробництва одного кВт*години електроенергії. Фактор "1,1" для генерованого тепла заснований на середньому європейському коефіцієнті теплових установок 91%. Отже, E_p розраховується наступним чином:

$$E_p = 2,6 \cdot E_{el} + 1,1E_{th} \quad (1.2)$$

E_f – це кількість енергії, яка щорічно імпортується в систему. Це ефективна енергія від спалювання відходів, а також від використання звичайних видів палива для розігріву, в [ГДж/рік] або [МВт*годину/рік]. Для розрахунку E_f (1.3) повинна бути обчислена чиста теплотворна здатність палива Q_i , в [кДж/кг] і розрахована кількість палива m , яке використовується для запуску і зупинки процесу спалювання, включаючи паливо для підтримки необхідних температур з використанням допоміжних пальників:

$$E_f = \sum_{i=1}^n m_{f,i} \cdot Q_i \quad (1.3)$$

E_w – це річна енергія, що міститься в оброблених відходах у [ГДж/рік] або [МВт*годину/рік], розрахована з використанням чистої теплотворної здатності ТПВ Q_w та щорічного притоку відходів M_w :

$$E_w = M_w \cdot Q_w \quad (1.4)$$

E_i – це щорічно імпортована енергія, крім E_w і E_f у [ГДж/рік] або [МВт*годину/рік], яка складається з постачання електроенергії, пари або гарячої (охолодженої води) тощо, що необхідні для ефективної роботи установок.

0,97 - це фактор, який кількісно визначає втрати енергії внаслідок випромінювання і зольності.

Теплотворну здатність відходів було розраховано за емпіричною формулою Менделєєва [8]. Нижча теплота згоряння ТПВ на робочу масу складає 16466 кДж/кг.

Викладення основного матеріалу. При виборі технології утилізації відходів спираються на їх властивості, швидкість генерації та на відсотковий вміст різних фракцій відходів. Цей параметр називають морфологічним складом відходів і визначають шляхом сортування та визначення масової частки кожної фракції окремо. Основні компоненти ТПВ представлені в таблиці 1. Для розрахунку було використано середні зведені дані морфологічного складу відходів міста Харкова.

Таблиця 1

Морфологічний склад відходів, %

Найменування компонентів ТПВ						
Харчові відходи	Папір, картон	Пластик	Скло	Чорні, кольорові метали	Текстиль, деревина	Залишок
42,78	14,35	7,76	7,74	2,9	5,2	19,27

Наведемо приклад розрахунку за так званою формулою RI установки, яка містить: системи прийому, транспортування і завантаження сміття, подачі палива, подачі лужного розчину, обертову піч, систему газовідвідного тракту, системи видалення, транспортування шлаку і уловленої пилу, теплоутилізаційну станцію, компресорну станцію, водопідготовчу установку, систему контролю і керування. Установка є традиційною, наприклад, для Харківської області: продуктивністю 1000 кг/годину, за умови виробництва електроенергії 25 кВт·год за годину, середня теплотворна здатність відходів 6476,832 кДж/кг при вологості 60%, використання додаткового дизельного палива 20 кг/год, питома витрата електроенергії 70кВт/год.

$$RI = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97(E_w + E_j)} = \frac{(43536 \cdot 1,1 + 7884 \cdot 2,6) - (7533 + 22075)}{0,97(57000 + 7533)} = 0,62. \quad (1.5)$$

Проблеми з формулою RI . 1. Клімат - використання тепла замість електрики значно збільшує значення RI . Здатність установки використовувати тепло, що виділяється, багато в чому залежить від клімату. Наприклад, значення градусоденного опалення (HDD) – кількісні показники, що відображають потребу в енергії для обігріву будинків та підприємств – сильно різняться по Європі: у Португалії – 1007,58, а у Фінляндії – 4871,03.

2. Розташування - установка, розташована в сільській місцевості, навряд чи зможе ефективно використовувати тепло, що виробляється. Однак промислові райони незмінно є споживачами тепла, тому підприємства, розташовані у міських чи промислових районах, мають набагато більшу ймовірність знайти клієнта тепла та покращити свій рейтинг RI .

Головні висновки.

Під час роботи були проаналізовані складові формули RI . Вираз має деякі невідповідності, які були розглянуті декількома дослідниками з моменту її введення. По-перше, формула не є термодинамічно коректною. При розрахунку за формулою RI враховується ефективність використання енергії спалювання ТПВ, а не чиста вироблена енергія. Термін «вироблена енергія» відносять до валового виробництва енергії, а не до виробництва чистої енергії. З іншого боку, той факт, що електрика або тепло надходить в мережу, не обов'язково означає, що вони будуть використовуватися,

враховуючи віддаленість сміттєпереробних підприємств. У визначенні членів E_f і E_w існує кілька двозначностей. E_p розраховується з використанням енергії у вигляді електрики, помноженої на “2,6”, і тепла, виробленого для комерційного використання, помноженого на “1,1”. Але коефіцієнти “2,6” і “1,1” не мають термодинамічного сенсу (як і коефіцієнт “0,97”). При виробництві теплової та електричної енергії (основні складові, що збільшують значення RI), використовуються обладнання, в якому тепло від газів передається через стінку. Відомо, що теплопередача через стінку малоефективна і тому гази після теплоутилізаційного обладнання мають високу температуру. Тому у формулі енергоефективності доцільно було б враховувати коефіцієнт використання енергії спалювання відходів на промислові технології, наприклад при виробництві будівельних матеріалів. Крім того, великі підприємства мають більший рейтинг RI по спалюванню сміття (потужністю більше 100 000 т/рік).

Таким чином, надійний підхід має бути критичним та творчим, необхідно почати з існуючих сильних сторін міста та спиратися на них та залучити всі зацікавлені сторони до розробки своїх власних місцевих моделей. Навчання один у одного у глобальній спільноті практиків дає можливість «вибирати і змішувати», приймати та адаптувати рішення, які працюють у конкретній місцевій ситуації. Якщо місто знаходиться на ранній стадії модернізації своєї системи поводження з твердими відходами, то важливо проаналізувати те, що вже працює, і проектувати (будувати) спираючись на це, а не починати з нуля. Ключовим моментом тут є визначення простих, відповідних і доступних рішень, які можна впроваджувати поступово, надаючи мешканцям найкращу систему, яку вони можуть собі дозволити. Перший крок повинен включати поширення збору с сортуванням на все місто та поступову відмову від відкритих звалищ шляхом їх заміни місцями контрольованого поховання. Також необхідно зосередити увагу на пронаращування існуючих темпів рециклінгу та життя заходів щодо стримування зростання відходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для розроблення рекомендацій для промислового впровадження стратегії отримання енергії з муніципальних відходів.

Література

1. Kapra Waste-to-Energy Plants in Europe in 2017. <https://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2017/> Last update: 25/04/2019.
2. Activity area top waste energy plant. Photo: Dragor Luftfoto. <https://iaks.sport/news/activity-area-top-waste-energy-plant>.
3. Wilson D.C., Rodic L., Scheinberg A. Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*. 2012. № 30(3), 7. P. 237- 254. doi: 10.1177/0734242X12437569
4. Dijkgraaf E., Gradus R. Waste management in the Netherlands. *Handbook on waste management*. 2014. P. 287-315.
5. Halkos G., Petrou Kleoniki N. Analysing the Energy Efficiency of EU Member States: The Potential of Energy Recovery from Waste in the Circular Economy. *Energies*. 2019. Vol. 12(19). P. 1-32.
6. Llanes J. L., Kalogirou E. Waste-to-Energy Conversion in Havana: Technical and Economic Analysis. *Social and Economic Aspects of Waste Management 2019*. (4), 119. P.1-17.
7. Waste Framework Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste. 2008-11-22. Official Journal of the European Union, 2008. P. L312/3–30.
8. Ильиных Г. В. Оценка теплотехнических свойств твердых бытовых отходов исходя их морфологического состава. *Вестник ПНИПУ. Урбанистика*. 2013. № 3. С. 125-136.