

DOI: 10.34132/ers.2023.01.01.03

**Андрєєв В'ячеслав Іванович**

кандидат технічних наук., доцент кафедри екології  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили,  
Миколаїв, Україна  
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1143-8043>

**Случак Олександр Ігорович**

старший науковий співробітник Науково-дослідної частини,  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили,  
Миколаїв, Україна  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5051-0648>

**Случак Олена Ігорівна**

аспірантка кафедри екології  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили,  
Миколаїв, Україна  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4065-7707>

## ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТРЕБИ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПЛОЩАХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

*В статті розглянуто енергетичний еквівалент потреб в посівних площах для забезпечення продовольчої безпеки України. Визначено, що інтеграція до WFE-стратегій продовольчої політики потребує всесторонньої оцінки енергетичної складової виробництва сільгосппродукції відносно площ орних земель, що включатиме і продуктивність основних культур в аспекті перетворення сонячної енергії на калорійність продовольства. Створено методологію та розраховано ККД перетворення сонячної енергії в товарну енергетичну цінність продукції продуктової корзини: 0,15-0,8% для зернових та овочів, 0,042-0,054% для м'яса, 0,015-0,035% для напоїв і спецій, 0,12% для молочних виробів, 0,37-0,93% для яєць. Загальний ККД споживання сонячної енергії людиною через харчовий ланцюг становить 0,22%. Для забезпечення цих потреб необхідно 1831,3 м<sup>2</sup> на які за вегетаційний період надходить 545,8 МВт сонячної енергії. Визначено, що коливання урожайності основних культур є синусоїдами і їх застосування в моделюванні потреби посівних площ дозволить в перспективі розробити динамічну модель керування пільгами та квотами для стимулювання покриття можливого дефіциту певних основних продуктів. Також оцінено обсяг енергії, що може бути без впливу на врожайність відібраний відновлюваною енергетикою при застосуванні мобільних конфігурацій її розміщення (або навпаки направлено на штучне освітлення врожаю під стаціонарними системами). Як результат, отримано базові показники, на які можна спиратись при розробці стратегії продовольчої безпеки міст, а також визначено, що стандартна при будинкова ділянка в 0,25 га повністю покриває потреби однієї людини з залишком.*

**Ключові слова:** орні землі; продовольча безпека; WFE-стратегія; ККД фотосинтезу; урожайність; продовольчий кошик; енергетика екосистеми.

## ENVIRONMENTAL AND ENERGY JUSTIFICATION OF THE NEED FOR AGRICULTURAL AREAS TO ENSURE FOOD SECURITY OF UKRAINE

*The article examines the energy equivalent of the needs in cultivated areas to ensure food security of Ukraine. It was determined that integration into WFE-strategies of food policy requires a comprehensive assessment of the energy component of agricultural production relative to the area of arable land, which will include the productivity of the main crops in the aspect of converting solar energy into food calories. A methodology was created and the efficiency of converting solar energy into the commodity energy value of the products of the grocery basket was calculated: 0.15-0.8% for cereals and vegetables, 0.042-0.054% for meat, 0.015-0.035% for drinks and spices, 0.12% for dairy products, 0.37-0.93% for eggs. The overall efficiency of human consumption of solar energy through the food chain is 0.22%. To meet these needs, 1,831.3 m<sup>2</sup> is needed, which receives 545.8 MW of solar energy during the growing season. It was determined that the yield fluctuations of the main crops are sinusoidal and their use in modeling the need for sowing areas will in the future allow to develop a dynamic model of management of benefits and quotas to stimulate the coverage of a possible shortage of certain main products. Also estimated is the amount of energy that can be used without affecting the yield by renewable energy when using a mobile configuration of its placement (or, on the contrary, directed to artificial lighting of the crop under stationary systems). As a result, basic indicators were obtained, which can be relied upon when developing a food*

security strategy for cities, and it was also determined that a standard household plot of 0.25 hectares fully covers the needs of one person with a surplus.

**Keywords:** arable land; food safety; WFE strategy; Efficiency of photosynthesis; crop capacity; food basket; ecosystem energy.

**Вступ.** Продовольча безпека є одним з ключових елементів розвитку людства. Постійний ріст населення, що вже сягнуло 8 млрд, змушує задуматись над тим, чи вистачить продовольства для забезпечення базових потреб кожного.

В даному аспекті особливо важливими лишаються: ефективність фотосинтезу продовольчих культур; потреба в посівних площах на душу населення при існуючій урожайності; конфігурація споживчого кошика і продовольча культура споживання; способи підвищення ефективності забезпечення продовольством.

В даному дослідженні питання ефективності сільського господарства та потреб людини за продовольчою корзиною розглянуто з точки зору енергетичного балансу з визначенням ККД отримання харчової продукції першої ланки (рослинна їжа) та другої (м'ясо після перерахунку через норми кормів).

В основі розрахунків лежать дані про склад продуктової корзини, урожайність культур, що в ній задіяні, прихід сонячної енергії на одиницю площі поля, відсоток маси урожаю від маси всієї рослини, енергію, що затрачується на обробку урожаю, норми годівлі свійських тварин на одиницю маси та ряд інших факторів.

Для автоматизації необхідно максимально наблизити отримуваний ресурс до вказаного в нормах. Це дозволить дізнатись яка площа сільськогосподарських земель потрібна для прогодування однієї людини, ККД фотосинтезу ряду основних рослин, та оцінити реальність автономної системи самозабезпечення в надзвичайних ситуаціях для домогосподарства з огородньою ділянкою в 25 соток.

Крім того, врахування динамічної моделі урожайності основних культур дозволить розробити прогноз коливань потреб в сільськогосподарських площах, та оцінити можливості гідропоніки в автономному забезпеченні міст в умовах надзвичайних ситуацій.

**Постановка проблеми.** В світовій практиці оцінка проблематики потреб в посівних площах тісно пов'язана з кліматичною політикою та моделлю WEF (water-energy-food) [1]. Це особливо важливо в рамках продовольчої політики ООН щодо Африки та інших регіонів з недостатньою урожайністю для самозабезпечення [2].

В дослідженні [3], автори чітко демонструють, що хоча проблема такого характеру для Європи, і зокрема одного з регіонів Італії – Сардинії не стоїть, але кількість площ, що припадає на виробництво пшениці, м'яса та молока за останні 50 років скоротилась з 6 тис м<sup>2</sup> до 5 тис м<sup>2</sup> на душу населення при загальних площах сільськогосподарських земель близько 0,7 га на людину. Це об'єктивно свідчить про дві речі: підвищення продуктивності сільгоспвиробництва та займання частини площ під інші потреби (зокрема відновлювану енергетику).

Автори [4] вказують на те, що на душу населення для забезпечення продовольчої безпеки припадає біля 0,1 га в країнах, що розвиваються та 0,03 га в розвинених країнах. Така велика різниця не може бути обумовлена урожайністю, а тому очевидно прив'язана до реальної статистики структури землекористування, без врахування експорту та імпорту.

До такої структури, зокрема, не відносять площі акваторії та прісних водойм, відведені під рибориство [5], так як аквакультура вносить все більш суттєвий вклад в продовольчу безпеку людства. До того ж, нормативи посадки та споживання продовольства у ставовому господарстві є меншими, ніж для м'ясних ферм [6].

Варто, також враховувати площі, зайняті під енергетичні культури [7] та біомасу [8]. Біоенергетика поступово розширює свій вклад в загальну структуру енергоспоживання Європи, що неминуче міняє її в світовому масштабі. Знаходження балансу між продовольчим, енергетичними культурами, та площами, зайнятими під фотоселектричні і вітрові системи [9] є одним з основних завдань WEF-логістики найближчого майбутнього.

Особливо важливим це виглядає при розробці в майбутньому заходів з одночасного використання цих площ при застосуванні вітряків та СЕС повітряного базування, що даватимуть часткове затінення, або відведенні частини енергії СЕС для штучного освітлення площ під ними.

**Мета та методи дослідження.** Метою дослідження є розробка еколого-енергетичного обґрунтування потреби в площах сільськогосподарських земель для забезпечення продовольчої безпеки України.

Об'єкт дослідження: Енергетичний еквівалент урожайності основних продовольчих культур та ефективність перетворення кормів в живу масу худоби.

Предмет дослідження: Потреба в сільськогосподарських землях для забезпечення базових потреб людини за харчовою корзиною України.

Основні завдання дослідження:

1. Оцінити потребу в посівних площах на душу населення за середньою урожайністю та коливання урожайності основних продуктів харчової корзини;

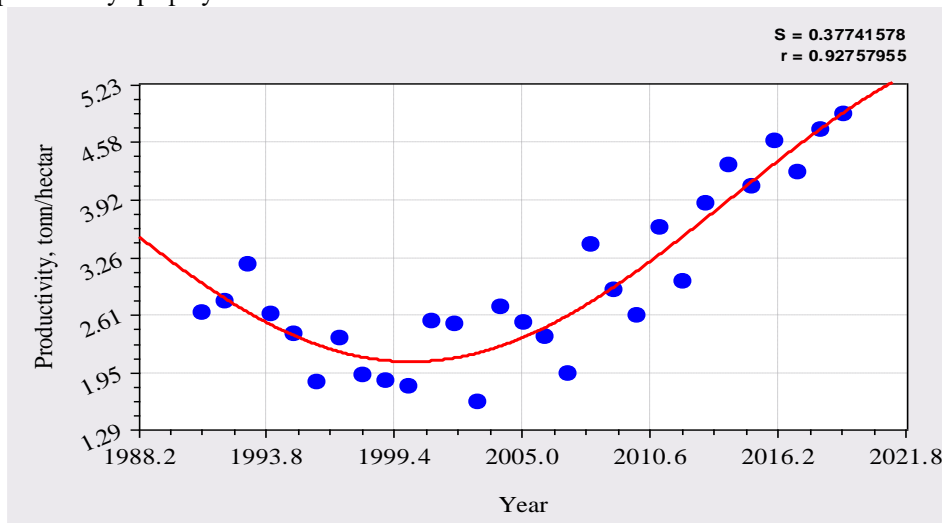
2. Визначити ККД фотосинтезу для продукції основних продовольчих культур за енергетичним еквівалентом приходу енергії сонця;

3. Визначити ККД вторинного перетворення енергії через корми в інші продукти харчової корзини та відповідно, потребу в них.

В основі дослідження є побудова моделі приходу сонячної енергії та перетворення її на харчову продукцію в первинній ланці, а також через корми в вторинній ланці сільгоспвиробництва. Для цього використано статистику Укрстату [10], створену раніше модель приходу сонячної енергії на одиницю площі [11] та нормативні акти щодо продовольчого кошику [12].

**Результати дослідження.** Для початку треба перевести всі готові продукти в їх складові: хліб це 0,8 кг муки на кілограм, а також 0,0048 кг дріжджів, 0,0144 кг солі, 0,0192 кг рослинної олії. При цьому 0,8 кг муки виходить з 1 кг пшениці, а з 1 кг соняшнику можна отримати 0,44 кг олії, що дає 0,044 кг насіння соняшнику на кг хліба. А також 1,32 кВт електроенергії, що за ККД хлібопічки 0,8 становитиме 1,65 кВт тепла.

Урожайність пшениці (Рис 1) в середньому становила 4,65 т/га. В випадку з пшеницею (Рис 1) ми отримуємо синусоїду з дуже великим періодом коливань (28 років між максимумом та мінімумом), тому без додаткової статистичної інформації складно гарантувати що це саме синусоїда, а не квадратична функція, яка знаходилась на 2 місці. Проте, звичайна логіка вказує на обмеженість ємності середовища, а тому неможливість необмеженого росту по квадратичному графіку.



Отримана функція (1) має медіану на рівні 4,65 т/га, що застосована в розрахунках. Сама ж функція дозволяє отримати динамічну модель.

$$P_{\text{wheat}} = 3,93 + 1,86\text{COS}(0,11Y - 1,36) \quad (1)$$

Це означає, що на один кг пшениці припадає площа 2,15 м<sup>2</sup>, а на один кг соняшнику при урожайності 2,31 т/га площа становитиме 4,33 м<sup>2</sup>. За нормами споживачької корзини на одну працездатну людину на рік припадає 62 кг хлібу пшеничного та 9,4 кг пшеничної муки. Крім того для отримання 1,19 кг олії з виходом 0,35 маси, потрібно 3,4 кг соняшнику, або 13,5 м<sup>2</sup>. Також на закладені в корзині 4 кг макарон потрібно 5,18 кг пшениці (1,036 кг муки на кг макарон), що потребує для росту 2,41 м<sup>2</sup>. Крім того в нормах закладено 39 кг житнього хліба, що потребує 0,6 кг житньої муки та 0,4 кг пшеничної на кг. Тобто на пшеницю для житнього хліба потрібно буде 15,6 кг пшениці або м<sup>2</sup>. При перемелюванні вихід муки з жита 75%, тому на 23,4 кг житньої муки буде потрібно 31,2 кг жита, тобто 2,94 м<sup>2</sup>/кг дає 10,6 м<sup>2</sup>.

Такі ж розрахунки для кожної з основних культур продовольчого кошику наведено в таблиці 1:

Таблиця 1

**Потреба в площі для основних продовольчих культур продуктового кошика**

Продукт	Урожайність, т/га	Площа м <sup>2</sup> на кг	Потреба за прод. Корзиною, кг	Загально потрібно, м <sup>2</sup>
Пшениця на хліб	4,65	2,15	62	133,3
Пшениця на макарони	4,65	2,25	4	8,6
Пшениця на муку	4,65	2,15	9,4	20,21
Пшениця на житній хліб	4,65	2,15	15,6	33,54
Соняшник на олію для пшен., хліба	2,52	3,97	3,4	13,5

Продовження таблиці 1

Соняшник на олію для житн. хліба.	2,52	3,97	2,14	8,49
Жито	3,8	2,94	39	10,6
Рис	6,2	1,61	2,5	4,03
Просо	5	2	1	2
Гречка	1,32	7,58	2	15,15
Овес	2,6	3,85	1,1	4,23
Ячмінь	3,51	2,85	0,5	1,425
Бобові	2,5	4	1,9	7,6
Картопля	20	0,5	95	47,5
Капуста	50	0,2	28	5,6
Томати та огірки	40	0,25	25	6,25
Морква	19,52	0,51	9	4,59
Буряк	46	0,22	9	1,96
Часник	8	1,25	0,9	1,125
Кабачки	20	0,5	13	7,5
Бахчеві	40	0,25	16	4
Ягоди (журавлина)	20	0,5	60	30
Сухофрукти (яб-лука)	20	0,5	4 (40)	20
Соняшникова олія	2,52	3,97	7,1(20,29)	80,53
Чай	1,3	7,69	0,4	3,08
Кава	0,6	16,7	0,5	8,33
Спеції (базилік)	4	2,5	0,3	0,75

Враховуючи розроблений нами графік (рис. 2.) приходу сонячної енергії, калорійність, урожайність, а також вегетаційний період кожної з вказаних рослин, ми можемо розрахувати їх корисний ККД (тобто ту частину сонячної енергії, яка переходить в біомасу).

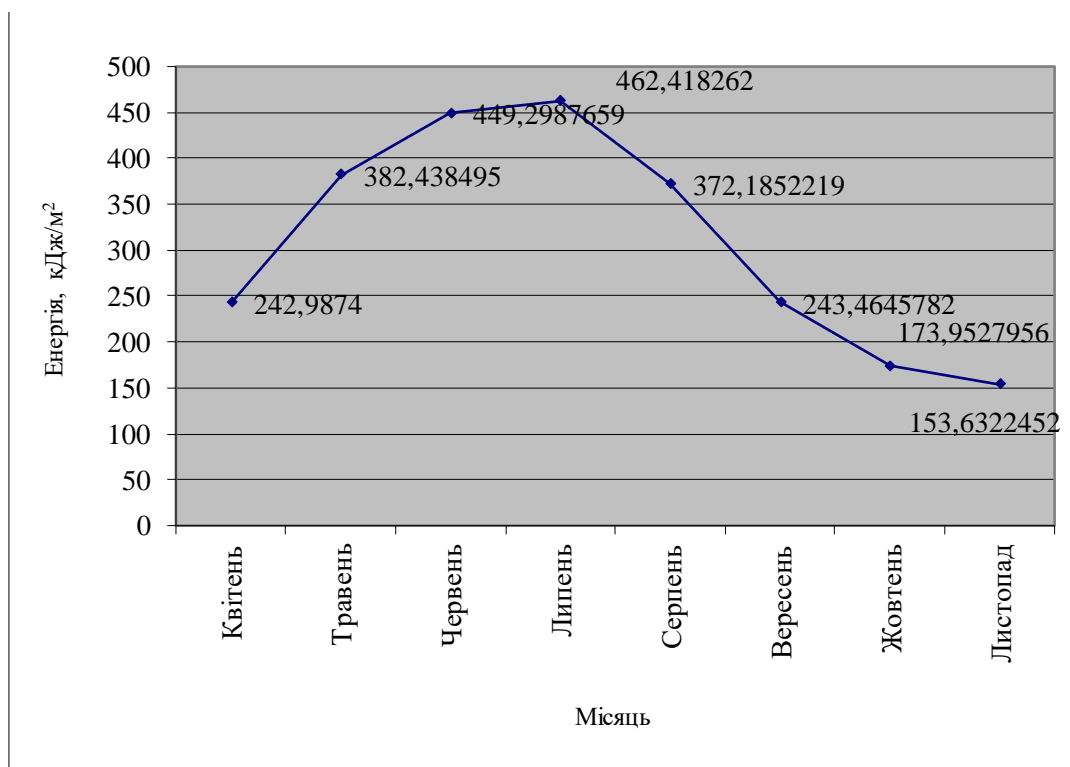


Рис 2. Помісячний прихід енергії сонця всередньому для України (Дж/м<sup>2</sup>)

Зокрема прихід енергії на кг маси розраховуватиметься за формулою (2):

$$E = E_{\omega} \cdot T \cdot S_m, \quad (2)$$

Де  $T$  – середня тривалість світлового дня в вегетаційний період 13,05 год,  $E_{\omega}$  – середній прихід енергії 210,5 Вт/м<sup>2</sup>,  $S_m$  – питома площа м<sup>2</sup> на кг маси продукту.

При розрахунку ККД продуктивності урожаю (Табл. 2), ми спираємось на отримані дані по приходу енергії за вегетаційний сезон, розраховані за рис 2, та калорійність кожного з зазначених продуктів, за нормами продовольчого коштика [12].

Таблиця 2

**ККД продуктивного врожаю**

Продукт	Урожайність, т/га	Калорійність, ккал/100 г	Прихід енергії Вт/кг маси	ККД, %
Пшениця	4,65	198	708732,45	0,325
Соняшник	2,52	379	1199625,82	0,367
Жито	3,8	287	2099825,91	0,159
Рис	6,2	335	486498,13	0,8
Просо	5	298	549405	0,63
Гречка	1,32	343	1457571,47	0,27
Овес	2,6	316	846083,7	0,43
Ячмінь	3,51	354	861192,338	0,48
Бобові	2,5	343	1098810	0,36
Картопля	20	88	151086,375	0,68
Капуста	50	24,6	71422,65	0,4
Томати та огірки	40	17,7	65241,8438	0,32
Морква	19,52	41,3	84058,965	0,57
Буряк	46	43	72521,46	0,69
Часник	8	130	377715,938	0,4
Кабачки	20	16,5	82410,75	0,23
Бахчеві	40	30,4	109881	0,32
Ягоди (журавлина)	20	28	192291,75	0,17
Сухофрукти (яблука)	20	52,1	293931,675	0,21
Чай	1,3	140,9	4647416,9	0,035
Кава	0,6	200	16744490,9	0,014
Спеції (базилік)	4	22,5	1098810	0,024

Означені розрахунки дають нам загальну потребу в площі 483,89 м<sup>2</sup> та прихід енергії 168637258,2 Вт.

Крім безпосередньо рослинної їжі в харчовій корзині присутні вторинні тваринні продукти, енергоефективність яких можна розрахувати на основі ефективності перетворення кормів в масу. Так норма в 220 яєць на рік, вцілому, задовольняється однією куркою, якій на рік потрібно 40 кг зернових в співвідношенні (16 кг пшениці, 8 кг ячменю, 6 кг вівса, 3 кг бобових та стільки ж суміші крейди або кісткового м'яса, 7 кг іншого (морква) та 16 кг зелені. Відповідно отримуємо такі затрати (Табл. 3):

Таблиця 3

**Потреби в посівних площах для кормів курей**

Продукт	Урожайність, т/га	Площа м <sup>2</sup> на кг	Потреба за прод. Корзиною, кг	Загально потрібно, м <sup>2</sup>	Надходження енергії, Вт
Пшениця на корм курей (яйце)	4,65	2,15	16	34,4	15332862,6
Ячмінь на корм курей (яйце)	3,51	2,85	8	22,8	831475,3
Овес на корм курей (яйце)	2,6	3,85	6	23,1	7488142,2
Бобові на корм курей (яйце)	2,5	4	3	12	6321159
Морква на корм курей (яйце)	19,52	0,51	7	3,57	588412,755
Люцерна на корм курей (яйце)	58	0,17	16	2,76	1342030,68

Загалом отримуємо 98,63 м<sup>2</sup> та 31909082,5 Вт сонячної енергії на 220 яєць, або 145018,6 Вт на яйце. З калорійністю 155,1 ккал на 10 г 30-75 г, ми маємо ККД перетворення енергії 0,37-0,93%.

Норма маргарину 2 кг на рік, 39% якого складає олія, це означає що на його виробництво піде 2,23 кг ріпакового чи соняшникового зерна, а це додаткова потреба в 8,85 м<sup>2</sup>.

На виробництво 60 л молока в одній корові йде 2 дні, що означає, що розрахунок ведеться по кормам, але з поправкою на те, що з 300 днів лактації на одну людину вистачає еквіваленту двох, тобто 0,0067 одна корова може забезпечити молоком 149 чоловік. Середня корова важить 720 кг, добова норма годування на 100 кг маси 3 кг концентратів (зернові 1,5 кг пшениці, по 0,5 ячменю, бобових та вівса), 10 кг зелені та коренеплодів (8 та 2 відповідно). Це означає 21,6 кг пшениці по 7,2 кг ячменю, бобових та вівса, 16 кг люцерни та 4 кг моркви на річний молочний раціон однієї людини (Табл. 4).

Таблиця 4

Потреби в посівних площах для кормів корів

Продукт	Урожайність, т/га	Площа м <sup>2</sup> на кг	Потреба за прод. Корзиною, кг	Загально потрібно, м <sup>2</sup>	Надходження енергії, Вт
Пшениця на корм корові (молоко)	4,65	2,15	21,6	46,44	15308620,9
Ячмінь на корм корові (молоко)	3,51	2,85	7,2	20,52	6200584,83
Овес на корм корові (молоко)	2,6	3,85	7,2	27,72	6091802,64
Бобові на корм корові (молоко)	2,5	4	7,2	28,8	7120288,8
Морква на корм корові (молоко)	19,52	0,51	4	2,04	336235,86
Люцерна на корм корові (молоко)	58	0,17	16	2,76	1342030,68

Відповідно ми отримуємо потребу в 128,8 м<sup>2</sup> та прихід 36399563,71 Вт енергії на 60 л молока (606659,395 Вт/л), калорійністю 64 ккал на 100 г, що дає ККД перетворення 0,12%.

Для 60 кг величини становитимуть 0,99 від таких для молока, але враховуючи, що ми оперуємо цілими числами в плані днів, то варто знехтувати 1% різниці, а ККД вказати як ті самі 12%.

Сир м'який, що в споживчому кошику вказаний в обсязі 10 кг становить 0,3 від маси молока, що означає, що для обчислення тих же величин по сиру достатньо всі величини домножити на 0,56. Це дає нам потребу в 71,84 м<sup>2</sup> площі та прихід 17866286,2 Вт енергії. Для обчислення тих же величин для сметани домножимо всі величини на 0,83, це дає потребу в та 106,5 м<sup>2</sup> площі та прихід 26480388,5 Вт енергії. Те саме для масла, що отримується шляхом збивання сметани. Проте, варто враховувати, що молоко, з якого було видалено сметану може бути застосованим для отримання сиру та сироватки, що дозволяє накладати затрати, щоб не рахувати їх окремо. З розрахунками для твердого сиру ми застосовуємо коефіцієнт 0,58 розрахований на основі того, що 3,5 кг становить 0,0058 від 60 кг молока, а коефіцієнт перетворення сиру 1 до 10. Отримуємо 74,4 м<sup>2</sup> площі та 18504367,9 Вт енергії.

Останніми лишаються розрахунки по м'ясній продукції тваринництва.

Використаємо дані всевітньої продовольчої програми та визначимо, що один кілограм кормів перетворюється в 0,1 кг яловичини, або 0,3 кг свинини, або 0,5 кг курятини. Таким чином для отримання зазначених в продуктивній корзині 16 кг яловичини потрібно 160 кг кормів, для 8 кг свинини 26,7 кг кормів, плюс додамо ще 6,675 для 2 кг сала, для 14 кг курятини 28 кг кормів та ще 8 кг для 4 кг субпродуктів. Знаючи пропорцію кормів для курятини, ми отримуємо 0,5 від значень для прогодування на виробництво яєць та ще 0,14 для субпродуктів і ще 0,32 для ковбасних виробів. Сумарно це дає 87,03 м<sup>2</sup> та 38792142,38 Вт для пшениці, 57,68 м<sup>2</sup> та 2103632,509 Вт для ячменя, 58,443 м<sup>2</sup> та 18944999,77 Вт для вівса, 30,36 м<sup>2</sup> та 15992532,27 Вт для бобових, 9,03 м<sup>2</sup> та 1488684,27 Вт для моркви, 6,98 м<sup>2</sup> та 3395337,62 м<sup>2</sup> для люцерни. Сумарно це 249,53 м<sup>2</sup> та 80717328,81 Вт енергії, що за калорійності курятини 239 ккал на 10 г дає ККД перетворення енергії 0,054%.

Знаючи пропорцію кормів для молочних порід корів, ми отримуємо 2,53 від зазначених значень. Це 117,5 м<sup>2</sup> та 38730810,88 Вт для пшениці, 51,92 м<sup>2</sup> та 15687479,62 Вт для ячменю, 70,13 м<sup>2</sup> та 15412260,68 Вт для вівса, 72,86 м<sup>2</sup> та 18014330,66 Вт для бобових, 5,16 м<sup>2</sup> та 850676,73 Вт для моркви, 6,98 м<sup>2</sup> та 3395337,62 Вт для зелені. Тобто сумарно 324,5 м<sup>2</sup> та 92090896,19 Вт, що за калорійності 250,5 ккал на 10 г дає ККД перетворення 0,049%.

Для свинини потрібен окремий розрахунок. Так, за типовою схемою в селах Миколаївщини до раціону свиней додають пшеницю, ячмінь та зелень в пропорції 2:1:4, доповнюючи це відходами в вигляді очисток овочів.

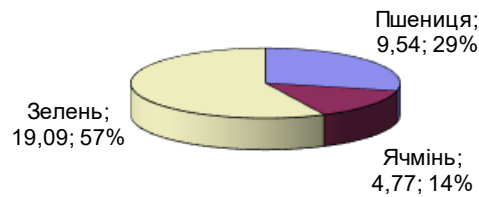


Рис 3. Структура споживання кормів свинями на 1 кг маси

Це означає, що на 33,4 кг кормів буде припадати 9,54 кг пшениці (20,5 м<sup>2</sup>, 6197865,28 Вт енергії), 4,77 кг ячменю (13,6 м<sup>2</sup> та 3360998,82 Вт енергії) та 19,09 кг зелені (3,25 м<sup>2</sup> та 1069790,43 Вт). Загалом це 37,35 м<sup>2</sup> та 10628654,5 Вт енергії. За калорійності в 380 (8 до 1 м'ясо з калорійністю 250 та сало з калорійністю 900) ккал на 100 г ми отримуємо ККД перетворення енергії 0,042%.

Окремим пунктом йде риба та морепродукти, що на рік становить 13 кг, що потребує водойму площею 13 м<sup>2</sup> та дає вихід маси 1 до 4 відносно внесених кормів, тобто потрібно 52 кг кому, для якого застосовується соляничковий шрот та залишки висівок після перемелювання муки [6], тому додаткової потреби в площі для вирощування кормів немає.

Відповідно ми отримуємо потребу в 1831,3 м<sup>2</sup> на людину та загальну витрату енергії сонця на прогонування однієї людини в 545,8 МВт на рік. Це всього лише 0,18 гектара. Так як нормативно це 2790 калорій на день, ми маємо ККД перетворення сонячної енергії в калорійність їжі 0,22%.

**Обговорення.** Проведені дослідження дозволили скласти загальне уявлення про енергоємність людського організму в харчовому ланцюзі сільгоспвиробництва для України. Використовуючи модель (1) та подібні ж моделі для інших сільгоспкультур, ми можемо створити прогноз коливань таких потреб в посівних площах, що дозволить мобільно резервувати їх та здійснювати інтелектуальне управління стимулами для посівів тих чи інших культур у вигляді квот при плануванні бюджету кожного року.

Крім того, спираючись на енергоємність та ККД фотосинтезу та сонячної енергетики ми можемо створити динамічну модель відбору сонячної енергії через часткове затінення, що дозволило б співіснувати сонячним батареям з рослинами. Так середня норма відбору енергії становить біля 46%, що майже зрівнює споживання рослинами та енергетикою.

В подальшому планується розробка динамічної моделі поєднання відновлюваної енергетики та сільгоспвиробництва в рамках WEF-логістики для надзвичайних ситуацій.

Внесок авторів:

Андрєєв В.І.: Пошук та аналіз наукових джерел, загальне керівництво, формулювання теми.

Случак О.І.: Формулювання мети, завдань та основної концепції роботи, математичне моделювання;

Случак О.І.: Оформлення статті, перевірка адекватності моделей, формулювання перспектив дослідження.

**Висновки.** Таким чином, було проведено математичне моделювання ефективності перетворення сонячної енергії в продукцію сільського господарства.

Оцінено потребу в посівних площах для повного продовольчого забезпечення за продуктовою корзиною України.

Визначено, що на забезпечення однієї людини нормативно в 2790 ккал на добу потрібно близько 545,8 Мвт сонячної енергії на рік, що в еквіваленті посівних площ в наших широтах становить 0,18 гектара з ККД перетворення енергії в калорійність їжі в 0,22%.

#### Список використаних джерел

- Herrera-Franco, G., Bollmann, H. A., Lofhagen, J. C. P., Bravo-Montero, L., & Carrión-Mero, P. (2023). Approach on water-energy-food (WEF) nexus and climate change: A tool in decision-making processes. *Environmental Development*, 100858. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100858>
- Muhirwa, F., Shen, L., Elshkaki, A., Chiaka, J. C., Zhong, S., Bönecke, E., Hirwa, H., Seka, A. M., Habiyakare, T., Tuyishimire, A., & Harerimana, B. (2023). Alert in the dynamics of water-energy-food production in African countries from a nexus perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 106990. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106990>
- Lombardi, G. V., Atzori, R., Acciaioli, A., Giannetti, B., Parrini, S., & Liu, G. (2019). Agricultural landscape modification and land food footprint from 1970 to 2010: A case study of Sardinia, Italy. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118097>

4. Zhen, L., Cao, S., Cheng, S., Xie, G., Wei, Y., Liu, X., & Li, F. (2010). Arable land requirements based on food consumption patterns: Case study in rural Guyuan District, Western China. *Ecological Economics*, 69(7), 1443-1453. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.008>
5. Bosma, R. H., & Verdegem, M. C. J. (2011). Sustainable aquaculture in ponds: Principles, practices and limits. *Livestock Science*, 139(1-2), 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.017>
6. Andryushchenko, A. I., & Alimov, S. I. (2008). *Stavove rybnytvo*. Kyiv: NAU. Retrieved from <https://uteka.ua/ua/publication/agro-4-gospodarski-operacii-v-agrosektori-35-praktichni-rekomendacii-shhodo-zari-blennya-viroshhuvalnix-staviv>
7. Miyamoto, K. (1997). *Renewable Biological Systems for Alternative Sustainable Energy Production*. FAO Agricultural Services Bulletin (Issue 128). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <https://www.fao.org/3/w7241e/w7241e05.htm#1.2.1>
8. Sonnino, A. (1994). Agricultural biomass production is an energy option for the future. *Renewable Energy*, 5(5-8), 857-865. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90105-8)
9. Bao, K., Thrän, D., & Schröter, B. (2023). Land resource allocation between biomass and ground-mounted PV under consideration of the food–water–energy nexus framework at regional scale. *Renewable Energy*, 203, 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.027>
10. Ukrstat. (2021). *Plantation. Sown areas for the harvest of 1991-2020*. Official website of the State Statistics Service. Retrieved from [ukrstat.gov.ua](http://ukrstat.gov.ua)
11. Andreev, V., Sluchak, O., Sluchak, O., Alekseeva, A., & Krysinska, D. (2022). Development of a methodology for modeling the state of the water ecosystem based on the methods of ecological stoichiometry, taking into account the energy approach. *Herald of Khmelnytskyi National University*, (315), 10-23. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-315-6-10-23.
12. Verkhovna Rada of Ukraine. (2011). On adoption as a basis of the draft Law of Ukraine on Food security of Ukraine: resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine dated 14.06.2011 No. 3498 -VI. Retrieved from <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3498-17>