

УДК 631.4; 631.31

**С. М. Кухарець**

к. т. н.,

**Б. А. Шелудченко**

к. т. н.,

**В. Р. Білецький**

аспірант,

**О. Ю. Романишин**

к. т. н.,

**С. В. Бушма**

аспірант,

**М. П. Дідківський**

аспірант,

**В. О. Шубенко**

к. т. н.,

Державний агроекологічний університет

## **МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТООБРОБНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ НА ЯКІСТЬ ЇХ РОБОТИ**

*Пропонується методика імітаційного моделювання динаміки взаємодії робочих органів з реологічними моделями ґрунту. Наводяться результати експериментального обґрунтування параметрів ротаційно-лопатевого робочого органу ґрунтообробного знаряддя.*

### **Постановка проблеми**

На стадії розробки технічної пропозиції і в подальшому – технічного завдання на проектування перспективних робочих органів ґрунтообробних знарядь виникає проблема вибору оптимального варіанту конструкції та узгодження рішень, що приймаються, із загальними та специфічними вимогами щодо стандартів та інших нормативних документів, що регламентують виконувати робочі процеси. Аналітично обґрунтовані параметри робочого органу (конструкційні, кінематичні, динамічні тощо) мають бути апробовані з точки зору раціональності пропонувані рішень. Перевірка аналітично обґрунтованих рішень ускладнена з огляду на багатоваріантність пропозицій і пов'язана із значними матеріальними витратами на виконання експериментів в польових умовах. Разом з тим, відомо, що на стадії технічної пропозиції пропонувані рішення можуть бути апробовані у вигляді макетного зразка або діючої моделі. Така апробація зводить до мінімуму можливі помилки при розробці технічного завдання та подальшого проектування технологічних систем [1].

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Перевірка параметрів пропонувані технічних рішень при розробці ґрунтообробних робочих органів може бути виконана в лабораторних умовах на макетних зразках з використанням моделі-імітатора ґрунтового каналу (рис.1) [2].

Модель-імітатор виконано у вигляді жолобу 1 з розміщеною в ньому реологічною моделлю ґрунту. Над жолобом на двох направляючих 2

встановлено візок 3 з підвіскою, на якій розміщено два досліджувані макети робочих органів, що виконані в масштабі 1:5. Візок приводиться в рух електродвигуном 4 за допомогою тяги 5.

Дослідження робочих органів на моделі-імітаторі, з точки зору взаємодії з ґрунтом, становить певну складність з огляду вибору матеріалу для реологічної моделі ґрунту. З усієї різноманітності відомих в наш час моделей реологічних властивостей ґрунту найбільш задовільно його поведінка описується в умовах пружно-в'язко-пластичного релаксуючого руйнування моделлю Шведова (рис. 2а) [3] та реологічною моделлю зсувних деформацій ґрунту, яка запропонована А. С. Кушнар'євим (рис. 2б) [4, 5], реологічні формули яких відповідно мають вигляд:

$$S_{chw} = H - (M / StV), \quad (1)$$

$$K_u = M - (M / StV) \quad (2)$$

Діаграму переміщень  $\epsilon$ , в залежності від зсувних напружень  $\tau$ , для моделі Шведова представлено на рис. 3 а, а для моделі, запропонованої Кушнар'євим – на рис. 3 б.

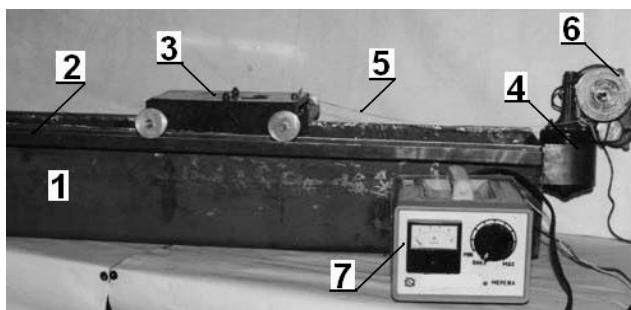


Рис. 1. Модель-імітатор ґрунтового каналу:

1 – жолоб; 2 – напрямні; 3 – візок; 4 – електродвигун з редуктором; 5 – тяга; 6 – блок; 7 – пульт керування (блок живлення)

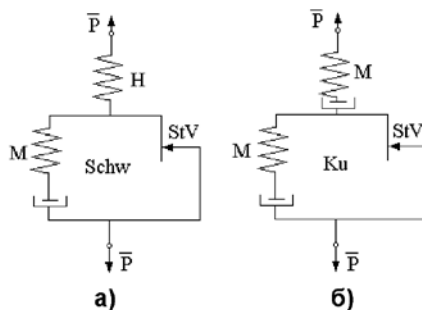


Рис. 2. а – реологічна модель пружнов'язкого тіла Шведова, б – узагальнена реологічна модель ґрунту для зсувних деформацій (за Кушнар'євим)

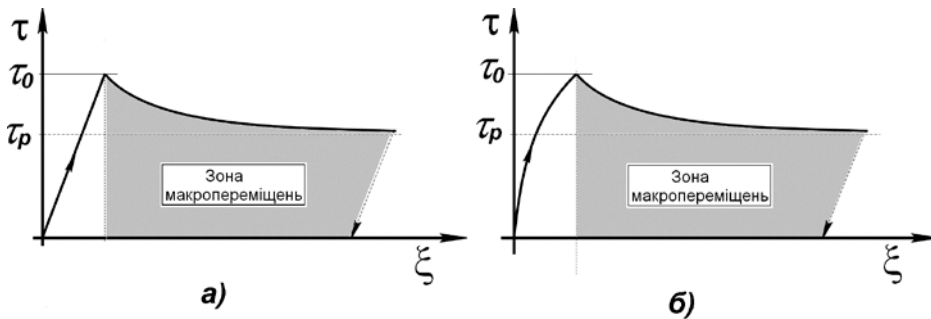


Рис. 3. Діаграми переміщень

( $\tau_0$  – початкове граничне напруження зсуву при миттєвому навантаженні;  $\tau_p$  – межа релаксації напружень): а – для моделі Шведова, б – для моделі Кушнарьова

*Мета досліджень:* вибір модельного середовища ґрунту; визначення основних параметрів ротаційно-лопатевого робочого органу ґрунтообробного знаряддя.

#### Методика дослідження

При виборі матеріалу для виготовлення моделі ґрунту, виходячи з [7], необхідно змоделювати властивості ґрунтового середовища в період макропереміщення структури, яка згідно [4, 5, 8] визначається релаксаційною ділянкою (зона макропереміщень на рис.3). При цьому реологічною характеристикою ґрунту є напруження релаксації  $\tau_p$ .

Граничні початкові напруження  $\tau_0$  для ґрунту визначали за методом Ребіндера (рис. 4) зануренням в середовище стандартного конусу під дією певного навантаження за наступною формулою:

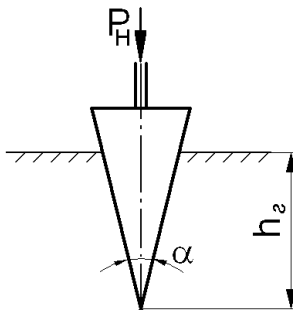


Рис. 4. Визначення граничних початкових напружень за Ребіндером

$$\tau_0 = k_a \frac{P_H}{h_z^2} \quad (3)$$

де:  $k_a$  – коефіцієнт, що враховує величину кута при вершині конуса (при  $\alpha_6=30^\circ$ ,  $k_a=1,108$ ; при  $\alpha_6=45^\circ$ ,  $k_a=0,658$ ; при  $\alpha_6=60^\circ$ ,  $k_a=0,413$ ; при  $\alpha_6=90^\circ$ ,  $k_a=0,159$ );

$P_H$  – величина прикладеного навантаження, Н;

$h_z$  – глибина занурення конусу в ґрунт, м [3, 9].

Згідно досліджень [10], граничні початкові напруження для дерново-підзолистих ґрунтів середнього ступеня оглеювання варіюють у межах:

$$\tau_0=0,10\dots0,17\text{МПа.}$$

Величину межі релаксації напружень можна визначити за формулою:

$$\tau_p = k_p \cdot \tau_0, \quad (4)$$

де:  $k_p$  – коефіцієнт релаксації (згідно з [10,11], для зсувних деформацій ґрунту модельний коефіцієнт релаксації лежить в межах  $k_p = 0,65...0,7$ ).

Найбільш повно ділянка деформаційної кривої на рівні  $\tau_p$  описується за допомогою моделі Прандтля (рис. 5) [12]:

$$P_r = H - StV; \quad (5)$$

Згідно з моделлю Прандтля (рис. 5), для адекватного імітування роботи пропонуваного ґрунтообробного ротаційного робочого органу для моделі ґрунту необхідно підібрати матеріал з  $\tau_p = \tau_{0M} = 0,07...0,12$  МПа, який має відповідати діаграмі на рис. 6.

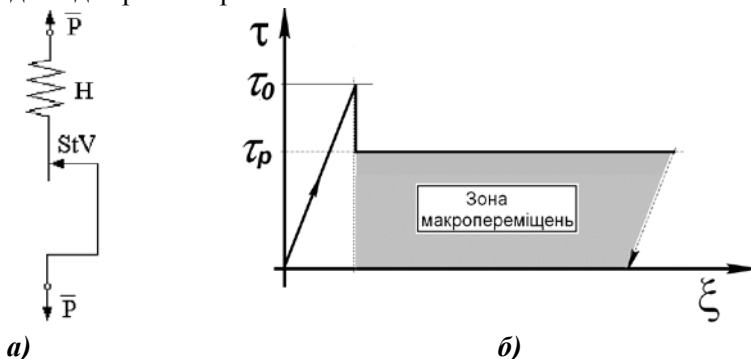


Рис. 5. а) Модель пружно-пластичного тіла Прандтля; б) діаграма переміщень



Рис. 6. Діаграма переміщень моделі реологічного тіла (середовища)

Для вибору матеріалу моделі вивчались властивості парафіну змішаного з різноманітними наповнювачами (піском, глиною, гліцериним, олією, масляною фарбою) при різних температурах. За результатами аналізу реологічних властивостей досліджуваних матеріалів, які мають імітувати реальний дерново-підзолистий супіщаний ґрунт середнього ступеня оглеєння обрано модельне середовище в складі парафіну та важких фракцій рослинної олії (в пропорції 1,5:1, відповідно) з  $t=35...40^\circ$ , та величиною межі напруження релаксації  $\tau_p = \tau_{0M} = 0,09...0,10$  МПа, визначеною за Ребіндером (3) [9].

Швидкість руху візка обиралася за теорією подібності [13] з використанням критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{S}{V}; \quad (6)$$

де:  $S$  – визначаючий розмір (в даному випадку глибина обробітку ґрунту);

$V$  – визначаюча швидкість (лінійна швидкість руху ротора).

Згідно з формулою (6), швидкість візка становила 0,3–0,5 м/с, що відповідає робочим швидкостям машинно-тракторного агрегату 5–10 км/год. Регулювання швидкості виконувалося двома способами: дискретно – за допомогою зміни радіуса приводного блока 6 (рис.1) і плавно – за допомогою зміни напруги живлення електродвигуна. Експерименти виконувались у відповідності до методу “заморожування” досліджуваного середовища [14].

#### *Схема виконання дослідів*

Модель ґрунтових шарів підфарбовується масляними фарбами різних кольорів, що дозволяє після охолодження парафіну сфотографувати результати дослідів в поздовжньому і поперечному перерізах ґрунтового каналу, а також дослідити переміщення шарів ґрунту під впливом моделі робочого органу. Після підігрівання парафіну ( $t \approx 30 \dots 40^\circ\text{C}$ ) виконується прохід робочих органів; фотографується поверхня моделі ґрунту, а після охолодження парафіну модель ґрунту виймається і фотографується поздовжній (рис. 7) і поперечний переріз каналу. Результати дослідів опрацьовуються на комп’ютері методом числового аналізу візуальної інформації за допомогою спеціально розробленої комп’ютерної програми [15]. Після сканування отриманого фотознімку візуальна інформація перетворюється в числовий масив за ознаками інтенсивності і кольору з роздільною здатністю 72 піксели/см. Описаний числовий масив після відповідної статистичної обробки та узагальнення інформації про стан поверхні моделі-імітатора дозволяє визначити показник повноти заробки як відношення площі поверхні з повною заробкою верхнього шару до всієї площі обробленої поверхні.

Експериментальна перевірка визначених теоретично оптимальних значень агротехнологічного показника повноти заробки  $k_z$  виконувалась методами планування експерименту [16] за планом  $2^2$ .

#### **Результати досліджень**

За результатами досліджень моделі-імітатора отримано візуальні данні у вигляді серії фотознімків з характеристиками просторового розташування окремих частин оброблюваного шару ґрунту за глибинами 0...2, 2...5, 5...7 см. Після математичного обробітку результатів комп’ютерного аналізу серії фотографій модельної поверхні ґрунту побудовано експериментальні

залежності показника заробки  $k_z$  ротаційно-лопатевих робочих органів: від довжини  $s$  ножа-лопаті (рис.8), від кута закручування  $\gamma_0$  робочої поверхні ножа-лопаті (рис. 9) та кута атаки  $\beta$  (рис. 10).

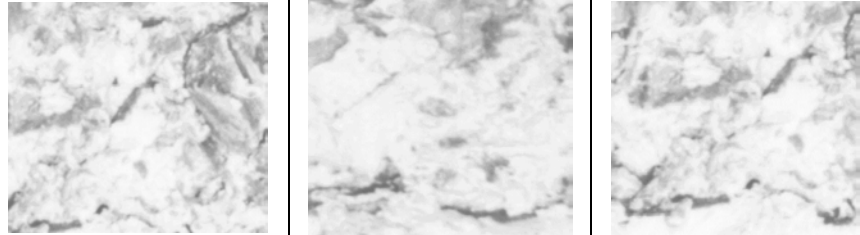
Вигляд модельної поверхні	Повторність дослідів при $s=35\text{мм}$ ; $\gamma_0=24^\circ$ ; $\beta=20^\circ$		
	№1	№2	№3
			
$k_z$	84,7	86,6	83,6

Рис. 7. Графічне представлення модельної поверхні ґрунту

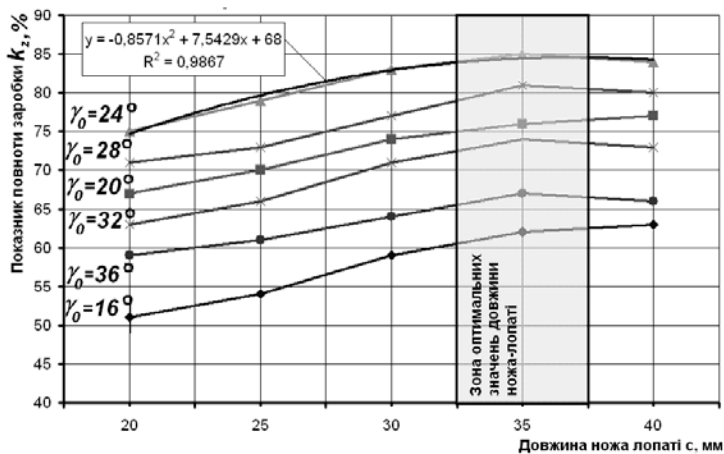


Рис.8. Графіки залежностей показника заробки від довжини ножа-лопаті та кута закручування робочої поверхні

Аналіз залежностей (рис. 8) свідчить про те, що показник заробки пропонованого робочого органу зі збільшенням довжини ножа-лопаті з 20 мм до 35 мм збільшується майже лінійно, а зі збільшенням довжини до 40 мм – зменшується, що можна пояснити заляпанням проміжку між робочими органами та, як наслідок, погіршенням агротехнологічних показників обробітку. Максимальний показник заробки досягається при використанні робочих органів з кутом закручування робочої поверхні  $24^\circ$ , і його визначено відповідно до (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,987$ ):

$$k_{24^\circ} = -0,86c^2 + 7,54c + 68. \quad (7)$$

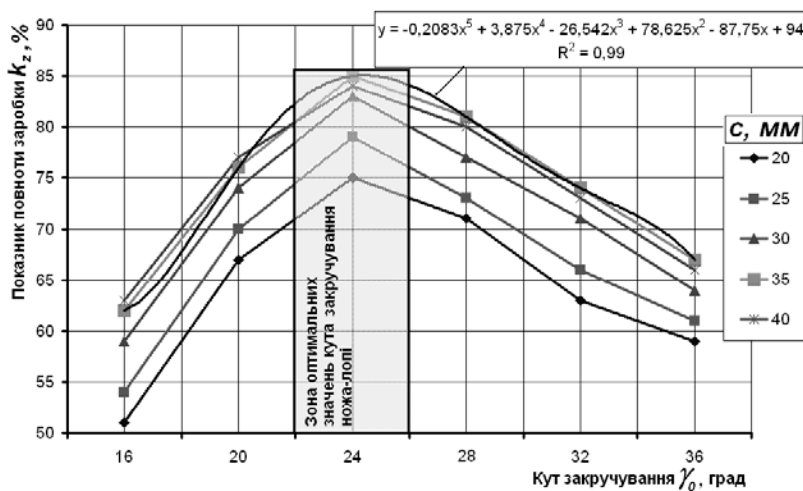


Рис. 9. Графіки залежностей показника заробки від кута закручування робочій поверхні ножа-лопаті та довжини ножа-лопаті

За результатами аналізу залежності показника заробки від кута  $\gamma_0$  (рис. 9) можна зробити висновок, що при збільшенні кута закручування з  $16^\circ$  до  $24^\circ$  показник заробки зростає і становить 85%, при подальшому збільшенні кута до  $36^\circ$  закручування відбувається зменшення значення показника заробки. Отже, при куті закручуванні ножа-лопаті ( $\gamma_0 = 24$ ) профіль передньої поверхні є найоптимальнішим з точки зору як розпушуючої, так і обертаючої здатності знаряддя. Крім того, необхідно зауважити, що максимальний показник заробки досягається за довжини ножа-лопаті, яка становить 35 мм і визначений, з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,99$ , поліномом:

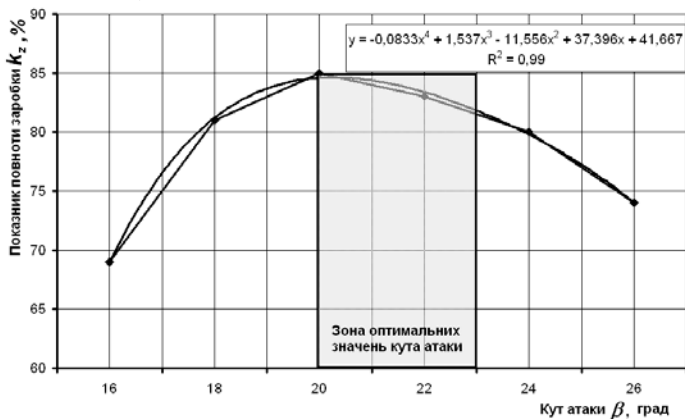


Рис. 10. Графік залежності показника заробки від кута атаки батареї робочих органів при  $s=35\text{мм}$ ,  $\gamma_0=24^\circ$

$$k_{35} = -0,21\gamma_0^5 + 3,88\gamma_0^4 - 26,54\gamma_0^3 + 78,63\gamma_0^2 - 87,75\gamma_0 + 94 \quad (8)$$

За викладеним вище аналізом результатів модельного експерименту визначено кут  $\beta$  установки робочих органів (рис.8). З аналізу залежності (рис. 9) показника заробки  $k_z$  від кута атаки  $\beta$  при оптимальних значеннях довжини  $c = 35$  мм та кута закручування  $\gamma_0 = 24^\circ$  робочої поверхні ножа-лопаті впливає, що найбільше значення показник заробки має при кутах атаки в межах  $20^\circ..23^\circ$ . При куті  $\beta = 20^\circ$  перекриття зон обробітку сусідніх роторів батареї набуває мінімально-граничного значення, а при подальшому збільшенні кута атаки відбувається зниження значення показника заробки. Таким чином, залежність показника заробки і кута атаки батареї робочих органів можна виразити з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,99$ , за допомогою поліному:

$$k_z = -0,08\beta^4 + 1,54\beta^3 - 11,56\beta^2 + 37,40\beta + 41,68 \quad (9)$$

Повний регресивний аналіз результатів експериментів з оптимізації конструкційних параметрів ножів-лопатей (довжини  $c$  та кута закручування  $\gamma_0$  робочої поверхні), відповідно до плану двофакторного експерименту  $2^2$ , дозволив визначити коефіцієнти регресії відповідного рівняння:

$$k_z = -89,29 + 2,03 \cdot c + 9,98 \cdot \gamma_0 - 2,2 \times 10^{-2} \cdot c^2 - 7 \times 10^{-3} \cdot c \cdot \gamma_0 + 1,9 \times 10^{-1} \cdot \gamma_0^2 \quad (10)$$

Визначенні коефіцієнти регресії рівняння (10) дозволяють графічно окреслити поверхню відгуку (9).

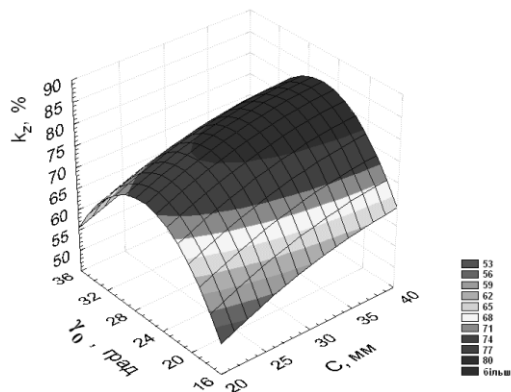


Рис. 11. Поверхня відгуку показника повноти обробітку  $k_z$  в залежності від ширини  $c$  та кута закручування  $\gamma_0$  робочої поверхні ножа-лопаті

Дослідження поверхні (рис. 11) на екстремум дозволяє остаточно встановити такі параметри робочого органу:

- довжина робочої поверхні ножа лопаті  $c = 35$  мм (з урахуванням масштабного коефіцієнту  $\mu = 5$ , довжина робочої поверхні ножа-лопаті становить 175 мм);



- кут закручування передньої робочої поверхні  $\gamma_0 = 24^\circ$ ;
- кут атаки батареї робочих органів становить  $\beta = 20^\circ$ .

Ці параметри забезпечують максимальний показник заробки  $k_z$  на рівні 85 %.

### Висновки

1. За результатами аналізу реологічних властивостей досліджуваних матеріалів, які мають імітувати реальний дерново-підзолистий супіщаний ґрунт середнього ступеня оглеення обрано модельне середовище в складі парафіну та важких фракцій рослинної олії (в пропорції 1,5:1, відповідно) з  $t=35^\circ\dots 40^\circ$ , та величиною межі напруження релаксації  $\tau_p = \tau_{0m} = 0,09\dots 0,10$  МПа.

2. В результаті імітаційного моделювання встановлено: довжина полиці ножа лопаті ротаційно-лопатевого робочого органу  $c=0,175$  м; кут закручування твірної  $\gamma_0=24^\circ$ ; оптимальний кут атаки батареї пропонувананих робочих органів  $\beta = 20^\circ$ .

### Перспективи подальших досліджень

Пропонована методика імітаційного моделювання динаміки взаємодії робочих органів з реологічними моделями ґрунту та відповідне експериментальне обладнання можуть бути використаними для дослідження широкого спектру ґрунтообробних ротаційних робочих органів.

### Література

1. *Гуков Я. С.* Обробіток ґрунту: технологія і техніка. – К.: Нора-принт, 1999. – 279 с.
2. Модельні дослідження макетів ротаційних робочих органів ґрунтообробних знарядь / С. М. Кухарець, Б. А. Шелудченко, В. О. Шубенко та ін. // "Механізація сільськогосподарського виробництва": Зб. наук. пр. Нац. аграр. ун-ту. – К., 2000. – №8. – С. 199–202.
3. *Гольдштейн М. Н.*, Механические свойства ґрунтов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1971. – 368 с.
4. *Кушнарєв А. С.* Механика почв: Задачи и состояние работ // Механизация и электрификация селського хозяйства. – 1987. – № 3. – С. 9–13.
5. *Кушнарєв А. С., Кочев В. И.* Механико-технологические основы обработки почвы. – К.: Урожай, 1989. – 144 с.
6. *Кухарець С. М., Шелудченко Б. А., Забродський П. М.* Кінематична модель ротаційного ґрунтообробного знаряддя // Вісник Державного агроєкологічного університету. – Житомир: 2002. – № 1. – С.133–137.

7. Шелудченко Б. А. Агромеханіка ґрунтів. – Житомир, Полісся, 1992. – 249 с.
  8. Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. Пер. – с англ. А. Э. Габриэляна. Под ред. Ю.А. Смирнова. – М.: Агропромиздат, 1986. – 249 с.
  9. Шелудченко Б. А. Обоснование рабочего процесса и параметров глубокорыхлящих рабочих органов объемного типа: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Глеваха, 1990. – 207 с.
  10. Булгаков В. М., Шелудченко Б. А. Самоорганізація ґрунтових структур. – К.:Нора-принт, 1998. – 58 с.
  11. Шубенко В. О. Обґрунтування процесу роботи та параметрів кільцевого робочого органу дискової борони: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. – Житомир, 2002. – 168 с.
  12. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. – М.: Высш.шк., 1989. – 624 с.
  13. Маценуро В. М. Исследование сопротивлений почв и ґрунтов методами теории подобия // Вопросы земледельческой механики / т. 19. – Минск: Урожай, 1970. – С. 3–52.
  14. Хамова-Малькова Р. И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методами. – М.: Наука, 1970. – 115 с.
  15. Надійність роботи ґрунтообробного знаряддя з “кільцевими” ротаційними робочими органами за наявності у них технологічних тріщин / Б. А. Шелудченко, В. О. Шубенко, С. М. Кухарець та ін. // Вісник Державної агроекологічної академії України. – Житомир, 1999. – №1–2. – С. 124–129.
  16. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
-